



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



APLIKACE NANOTECHNOLOGIÍ V OBORU SPALOVACÍCH MOTORŮ

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Jiří Bucek**
Vedoucí práce: Ing. Pavel Brabec, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **Jiří Bucek**
Supervisor: Ing. Pavel Brabec, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří Bucek**
Osobní číslo: **S14000031**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **APLIKACE NANOTECHNOLOGIÍ V OBORU
SPALOVACÍCH MOTORŮ**
Zadávající katedra: **Katedra vozidel a motorů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište mechanické ztráty v pístovém spalovacím motoru a proveďte rešerši současného stavu.
2. Vyhledejte a popište možné nabízené úpravy (konstrukční a změna povrchu) jednotlivých součástí spalovacího motoru s cílem snížení pasivních odporů.
3. Navrhněte možné použitelné opatření pro snížení mechanických ztrát u spalovacího motoru 250 ccm o vysokém litrovém výkonu.
4. Cílem bakalářské práce je využití výsledků na Katedře vozidel a motorů (TUL).

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: cca 40 stran textu

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] VLK, František. *Teorie a konstrukce motocyklů 1, 2*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2004. ISBN 80-239-1601-7.
- [2] BASSHUYSEN, Richard a Fred SCHÄFER. *Internal Combustion Engine Handbook - Basic, Components, Systems, and Perspectives*. Wiesbaden, Germany: Vieweg Verlag, 2002. ISBN 0-7680-1139-6.
- [3] MACEK, Jan a Bohuslav SUK. *Spalovací motory I*. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00919-X.
- [4] *Solving the Powertrain Puzzle*, 10. Schaeffler Kolloquium. Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, 2014.
- [5] DVOŘÁK, Martin. *Zkušební stanoviště pro testování třecích dvojic spalovacích motorů*. TU v Liberci: Diplomová práce, 2016.
- [6] SEIDEL, Filip. *Metody měření pasivních odporů spalovacích motorů*. TU v Liberci: Bakalářská práce, 2016.
- [7] běžně dostupné materiály - odborné časopisy, veletrhy, konference, internet.


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Brabec, Ph.D.


Katedra vozidel a motorů

Datum zadání bakalářské práce: 1. března 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 1. června 2018


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Robert Vozenílek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. března 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.


Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 3.7.2017

Podpis: 

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu panu Ing. Pavlu Brabcovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je analýza současného stavu mechanických ztrát v pístových spalovacích motorech a možná aplikace nanovrstev na jednotlivé komponenty. Úvodní část pojednává o mechanické účinnosti pohonných jednotek a mechanismech vzniku třecích ztrát. Další kapitoly popisují současná moderní řešení snižování mechanických ztrát obsahující technologie povlakování a konstrukční metody. V závěru práce jsou uvedeny používané metody k predikci těchto ztrát a navržené opatření pro jednoválcový motor o vysokém litrovém výkonu. Práce má za úkol seznámit čtenáře s problematikou mechanické účinnosti v oblasti spalovacích motorů.

Klíčová slova

Mechanické ztráty, spalovací motor, tribologie, tření, účinnost, DLC, povlaky, povrchové úpravy, nanotechnologie, nanovrstvy.

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to analyze the current state of mechanical losses in piston combustion engines and the possible application of nano-layers to individual components. The introductory section focus on mechanical efficiency of drive units and creation mechanisms of friction losses. The next chapters describe current modern solutions for reducing mechanical losses, including coating technologies and design methods. At the end of the thesis the methods, used to predict these losses and the proposed measures for the single cylinder high-liter engine are presented. The aim of the thesis is to familiarize the reader with the issues of mechanical efficiency in the field of internal combustion engines.

Keywords

Mechanical losses, internal combustion engine, tribology, friction, efficiency, DLC, coating, surface treatment, nanotechnology, nanoscale.

Obsah

Seznam zkratk	9
Seznam obrázků	11
Úvod	13
1 Seznámení s problematikou vzniku mechanických ztrát ve spalovacím motoru:	14
1.1 Transformace energií ve spalovacím motoru:	14
1.2 Mechanická účinnost	15
1.3 Mechanické ztráty	16
1.4 Tribologie:	17
1.4.1 Tření:	17
1.4.2 Opotřebení	22
2 Současná technologická a konstrukční řešení pro snížení mechanických ztrát v pístových spalovacích motorech:	25
2.1 Mazivo	26
2.2 Materiálové složení spalovacího motoru	28
2.2.1 Blok motoru.....	28
2.3 Povrchové úpravy součástí spalovacího motoru.....	30
2.3.1 Chemické povrchové úpravy.....	31
2.3.2 Elektrochemické (galvanické) povrchové úpravy.....	31
2.3.3 Termické nástřiky (tepelné naprašování)	34
2.3.4 Texturování povrchu pomocí laseru (LST).....	37
2.3.5 DLC (Diamond Like Carbon) a nano-strukturní vrstvy	38
2.4 Konstrukční úpravy.....	44
2.4.1 Downsizing.....	45
2.4.2 Ostatní konstrukční úpravy	46
3 Metody výpočtu a měření mechanických ztrát	49
3.1 Metody výpočtu mechanických ztrát	50
3.1.1 Empirické modely	50

3.1.2	Semiempirické modely.....	51
3.1.3	Modely MKP.....	51
3.2	Metody měření mechanických ztrát.....	52
3.2.1	Měření na motoru se spalováním (vysokotlaká indikace).....	52
3.2.2	Metoda protáčení motoru elektrickým dynamometrem (bez spalování).....	53
3.2.3	Metoda extrapolace křivky spotřeby paliva (Willansovy čáry)	54
3.2.4	Morseova metoda vypínání jednotlivých válců	55
3.2.5	Metoda doběhu motoru (bez spalování).....	56
4	Aplikace nano-vrstev v pístovém spalovacím motoru.....	57
	Závěr	61
	Použité zdroje.....	62

Seznam zkratek

b	[m]	rozměr ve směru posuvu
B	[mm]	šířka ložiskového pouzdra
c	[mm]	ložisková vůle
CNB		Cubic Nitrid Boron
CVD		Chemical Vapour Deposition
D	[mm]	průměr pánve kluzného ložiska
DC		Direct Current (Stejnoseměrný proud)
DLC		Diamond Like Carbon
dV	[cm ³]	přírůstek okamžitého objemu válce
e	[mm]	excentricita čepu
f	[-]	koeficient tření
f _l	[-]	součinitel kapalinného tření
F _N	[N]	normálová síla
f _s	[-]	součinitel suchého tření
F _T	[N]	třecí síla
H	[mm]	tloušťka spáry
h	[mm]	tloušťka olejové vrstvy
HD		Hydrodynamické
HVOF		High Velocity Oxy-Fuel
I _{mot}	[kg.m ²]	redukovaný moment setrvačnosti motoru
j	[-]	celkový počet válců
LPPS		Low Pressure Plasma Spraying
LST		Laser Surface Texturing
MKP		Metoda Konečných Prvků
MoDTC		molybdenum dithiocarbamate
M _t	[Nm]	točivý moment motoru
n	[min ⁻¹]	otáčky motoru
p	[kPa]	okamžitý tlak ve válci
PACVD		Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition
P _e	[W]	efektivní výkon
PECVD		Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
p _h	[Pa]	HD tlak ve vrstvě pod čepem kluzného ložiska
P _i	[W]	indikovaný výkon
PLC		Polymer Like Carbon
p _{mech.z.}	[Pa]	střední tlak ztrát motoru
p _{se}	[Pa]	střední efektivní tlak
p _{si}	[Pa]	střední indikovaný tlak
p _{sil}	[kPa]	střední indikovaný tlak jednoho válce
PVD		Physical Vapour Deposition
P _z	[W]	ztrátový výkon

r	[mm]	poloměr čepu
R	[mm]	poloměr pánve ložiska
TCVD		Thermal Chemical Vapour Deposition
U	[m.s ⁻¹]	relativní rychlost
VPS		Vacuum Plasma Spraying
V_z	[dm ³]	zdvihový objem motoru
V_{z1}	[cm ³]	zdvihový objem jednoho válce
x	[mm]	souřadnice posunutí ve směru osy x
y	[mm]	souřadnice posunutí ve směru osy y
ZDDP		zinc dialkyldithiophosphate
α	[-]	podíl suchého tření
ε	[-]	relativní excentricita
η_m	[-]	mechanická účinnost motoru
μ	[Pa.s]	dynamická viskozita
ξ	[-]	bezrozměrná souřadnice pro zjednodušení výpočtu
Π	[-]	bezrozměrná tlaková funkce pro stacionární kluzné ložisko
σ	[Pa]	tlak
τ	[-]	koeficient pro výpočet "pse"
ν	[mm ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita maziva
φ	[-]	bezrozměrná souřadnice pro zjednodušení výpočtu
ψ	[-]	relativní ložisková vůle
ω_ξ	[rad.s ⁻¹]	úhlová rychlost čepu

Seznam obrázků

Obr. 1 Podílové grafy tepelných a třecích ztrát. (vlastní zpracování) [51]	14
Obr. 2 Procentuální rozdělení mechanických ztrát v pístní skupině [4].....	15
Obr. 3 Grafické porovnání středních tlakových ztrát ve vznětovém a zážehovém motoru [4]	16
Obr. 4 Stribeckova křivka [4]	18
Obr. 5 Schematický rozdíl vytvoření tlaku v kapalině [19]	20
Obr. 6 Schéma klínové mezery mezi čepem a pánví radiálního HD ložiska [1].....	21
Obr. 7 Způsoby opotřebení [1]	24
Obr. 8 Diagram vývoje maziva, kde zelená oblast značí olej z r.1997 a žlutá z r.2012. [10]	27
Obr. 9 Schéma rozdělení hliníkových bloků motorů.(vlastní zpracování) [5]	29
Obr. 10 Monolitický blok osmiválového motoru LT1 od firmy Corvette [23]	30
Obr. 11 Profil drsnosti vrstvy CROMAL® [17]	32
Obr. 12 Profil drsnosti povlaku NIKASIL® [17].....	33
Obr. 13 Termický nástřik plamenem [27]	35
Obr. 14 Princip HVOF metody [27]	35
Obr. 15 Termický nástřik elektrickým obloukem [27].....	36
Obr. 16 Princip plazmatického nástřiku [28]	37
Obr. 17 Graf porovnávající závislosti průměrných hodnot součinitelů tření na normálové síle [31]	37
Obr. 18 Grafické znázornění iontového bombardu [32]	38
Obr. 19 Schéma PVD technologie s magnetronovým naprašováním [36].....	40
Obr. 20 Schematické znázornění CVD metody z patentu firmy Siemens [37]	41
Obr. 21 Schéma PACVD technologie za použití RF ionizace [38].....	42
Obr. 22 Hybridizační stavy [34]	42
Obr. 23 Ternární fázový diagram vazeb [35]	44
Obr. 24 Downsizovaný motor DIG-TR od firmy Nissan s litrovým výkonem 196 kW/l [39]	45
Obr. 25 Různé typy pístů firmy MAHLE pro sportovní použití [40].....	46

Obr. 26 Rozdíl mezi klasickým a offset řešením [41]	47
Obr. 27 Uspořádání 3 a 5 ventilů v hlavě válců. [42]	48
Obr. 28 Vahadlo s rolničkou a dvoustupňovým nastavením od firmy Deplhi [43]	48
Obr. 29 Blok motoru s aplikovanou vrstvou NANOSLIDE [49]	57
Obr. 30 Řez A-A jednoválcovým motorem [50]	59
Obr. 31 Řez B-B jednoválcovým motorem [50]	60

Úvod

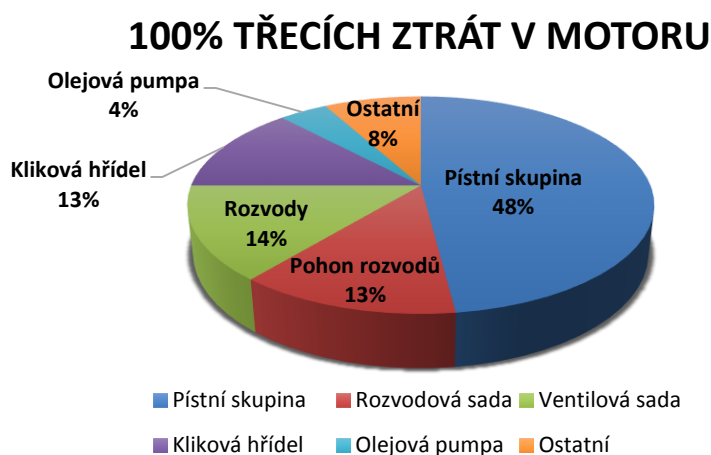
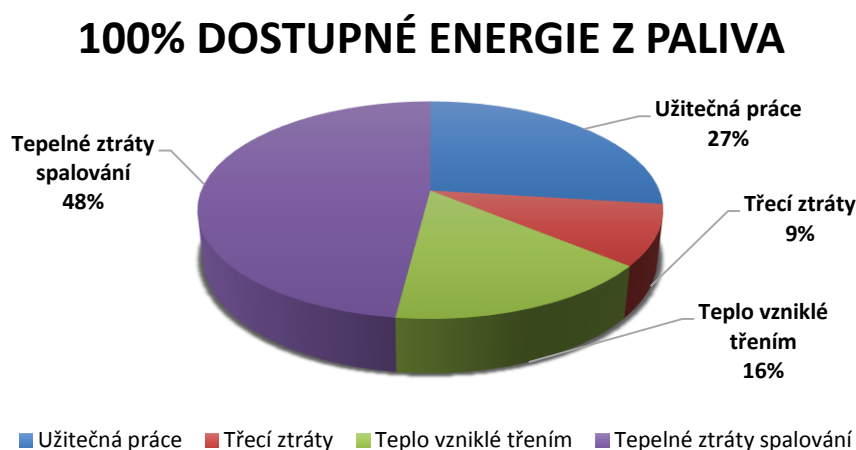
Vzhledem ke stále se zpřísnujícím emisním normám ze strany úřadů a konkurenceschopnosti na trhu jsou automobilky nuceny k velkým investicím do vývoje stále více úspornějších, výkonějších a účinnějších pohonných jednotek. Komplexně vzato se jedná o cílevědomé úsilí vyvinout agregát, který bude splňovat požadavky zákazníků i ekologických úřadů, avšak s vynaložením co nejmenších výrobních nákladů. Výrobci proto přišli s několika řešeními a filozofiemi výroby vedoucí k získání účinného vozidla.

Jako první lze vyzdvihnout soubor konstrukčních úprav Skyactiv od firmy Mazda obsahující mnoho úprav, které vedou ke snížení hmotnosti a zvýšení účinnosti a tuhosti vozidla. Mazda také nabízí na dnešní dobu již neobvyklé atmosferické zážehové motory, které i bez pomoci turbodmychadla vykazují vynikající hodnoty realné spotřeby paliva a celkové dynamiky jízdy. Dalším pojmem se staly i motory Ecoboost od firmy Ford. Zde je jedním z řešení zvyšování účinnosti i vývoj malých přeplňovaných tříválcových motorů. Takto zmenšené motory vykazují vysoký litrový výkon (75 kW/dm^3). Toto řešení však nese jistá rizika, která je nutná zohlednit. Jedním takovým je větší zatěžování komponent motoru. Ze znalosti jednoduchého vzorce pro tlak $p=F/S$ [kPa], kdy se síly zvyšují (přeplňování) zatímco plochy, na které působí, jsou stále stejné nebo i menší, je patrný růst tlaku na povrchu součástí. Vyšší namáhání na menší plochy takto „poddimenzovaných“ součástí ústí ve zvýšené opotřebení a snížení spolehlivosti. Zde nachází uplatnění aplikace tenkých kluzných vrstev vynikající velkou tvrdostí a nízkým koeficientem tření.[52] [53]

1 Seznámení s problematikou vzniku mechanických ztrát ve spalovacím motoru

1.1 Transformace energií ve spalovacím motoru

Jak je známo, většina potenciální chemické energie obsažené v palivech je při spalovacím procesu transformována v energii tepelnou a bez využití odvedena ze systému. K přeměně na mechanickou energii je využito dle různých zdrojů pouze 30-40 %, tedy zhruba třetina z celkového potenciálu. Tato hodnota je ovlivněna typem a technologickou vyspělostí daného motoru a celého vozidla. V následujících grafech je zobrazená celková transformace chemické energie získané z paliva a podílový graf třecích ztrát.



Obr. 1 Podílové grafy tepelných a třecích ztrát (vlastní zpracování) [51]

Z grafu je patrné, že pro zvýšení účinnosti pohonné jednotky existuje potenciál minimálně 25 % ve snížení mechanických ztrát. Na třecích ztrátách má majoritní podíl 48% pístní skupina spolu s válcem v bloku motoru. Dále následují ventily sání, výfuku a jim přidruženým komponent spolu s rozvodovou sadou a klikovou hřídelí. [51]



Obr. 2 Procentuální rozdělení mechanických ztrát v pístní skupině [4]

Zlepšení mechanické účinnosti je tedy cílem všech automobilek a jejich vývojových týmů. Spousta řešení počítá se zlepšením kluzných vlastností kontaktních povrchů. Kluzné vlastnosti závisí na kvalitě a tribologických vlastnostech povrchu. V této práci jsou probrány různé možnosti úprav a aplikací povlaků na povrchu součástí, které již jsou či by mohly být součástí sériové výroby motorů.

1.2 Mechanická účinnost

Působením tlaku spalín na píst se indikovaná práce w_i mění na práci w_e vykonanou na hřídeli. Během této přeměny vznikají tzv. mechanické ztráty w_m . Díky mechanickým ztrátám je efektivní výkon P_e [W] menší než indikovaný výkon P_i [W]. Z toho lze vyvodit vzorec pro mechanickou účinnost: [2] [3]

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = \frac{P_i - \sum_{i=1}^n P_z}{P_i} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_z}{P_i} [-] \quad (1)$$

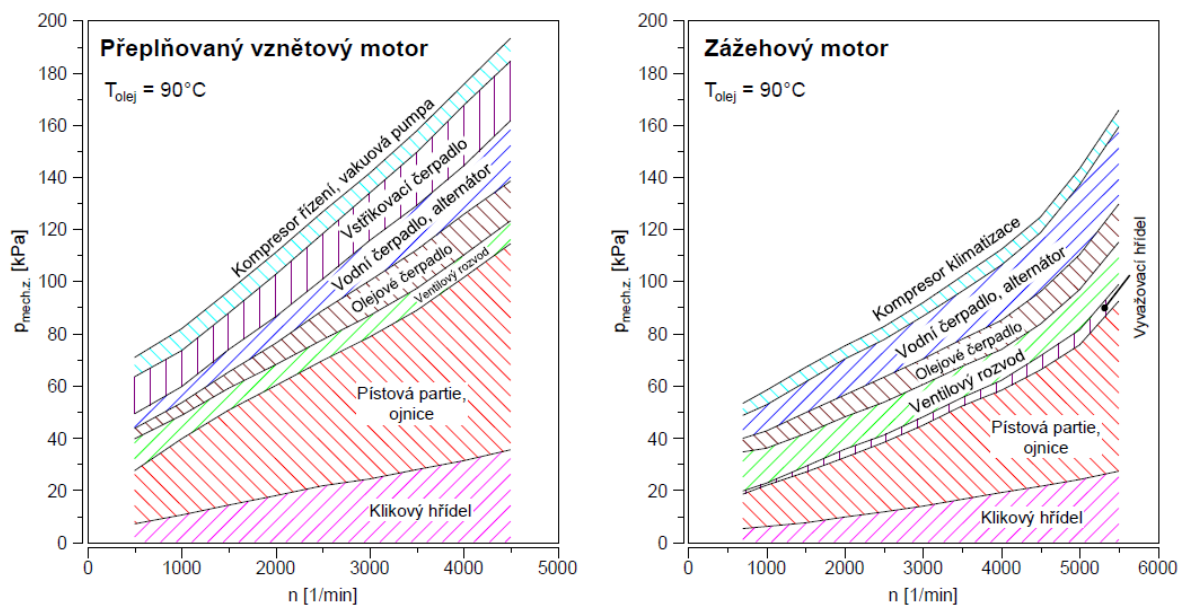
Kde:

$\sum P_z$ [W] značí součet všech mechanických ztrát (ztrátových výkonů)

1.3 Mechanické ztráty

U mechanických ztrát lze dle mechanismu jejich vzniku uplatnit rozdělení na třecí a ventilační. Třecí ztráty vznikají při relativním pohybu dvou kontaktních povrchů, případně uvnitř oleje. Ventilační ztráty vznikají odporem prostředí, nejvíce u rychle se pohybujících částí a při výměně náplně ve válci. Vznik mechanických ztrát je potřeba také zkoumat nejen v hlavních částech motoru, ale i v pomocných zařízeních. Za pomocná zařízení jsou uvažována čerpadla, dmychadla, ventilátory, alternátory a další. [3]

Výše mechanických ztrát je ovlivňována faktory, jako jsou například rychloběžnost a technologické provedení kontaktních ploch. Mechanická účinnost při konstantním zatížení a zvyšujících se otáčkách klesá. Dále je potřeba rozlišovat typy motorů, jelikož zážehové motory vykazují menší mechanické ztráty v závislosti na otáčkách než vznětové, kde je kompresní poměr mnohem větší. [3]



Obr. 3 Grafické porovnání středních tlakových ztrát ve vznětovém a zážehovém motoru [4]

1.4 Tribologie

Pro lepší popis současného stavu je potřeba si nejdříve vysvětlit vznik třecích ztrát a tření obecně. K tomu nám poslouží vědní disciplína nazývaná tribologie, která se mimo vzniku tření zabývá i vznikajícím opotřebením na povrchu těles. Tribologie, jakožto vědní obor, se zabývá chováním dotýkajících se povrchů (tzv. kontaktních dvojic) při vzájemném pohybu. Vysvětluje původ, příčiny a následky tření, mazání a vzájemného opotřebením těles. Pohyb lze definovat jako obecně kluzný, valivý, kmitavý nebo nárazový. V praxi se často uplatňuje více druhů pohybu současně. [1]

Tribologický proces je charakterizován interakcí třecích dvojic, mezilátky a okolí, ve kterém probíhá. Tyto interakce mohou být materiálové, fyzikální, chemické atd. Tření, a z toho vyplývající opotřebení, úzce závisí na složení a struktuře materiálů v kontaktu. Toto tření je dále ovlivněno použitím různých lubrikantů, jako jsou oleje, tuky a voda. Dalším faktorem opotřebením jsou i drobné částice mezi povrchy, kde se pozoruje jejich tvar, materiálové složení a velikost. Neméně důležitá je i teplota v systému, která ovlivňuje například viskozitu oleje, rozměrové poměry mezi součástmi apod. [1]

1.4.1 Tření

Nejznámější obecná definice říká, že: „ *tření je odpor proti relativnímu pohybu mezi dvěma k sobě přitlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů tangenciálním směru* “. Tato definice platí pouze pro vnější tření. Vnitřní tření takto není zcela přesně vystihnuto. Proto lze také tření definovat jako „ *ztrátu mechanické energie v průběhu, na začátku nebo při ukončení relativního pohybu kontaktní dvojice* “. Při výpočtech tření se setkáváme s tzv. součinitelem tření f , které charakterizuje podíl třecí síly F_T [N] k normálové F_N [N]. [1] [19]

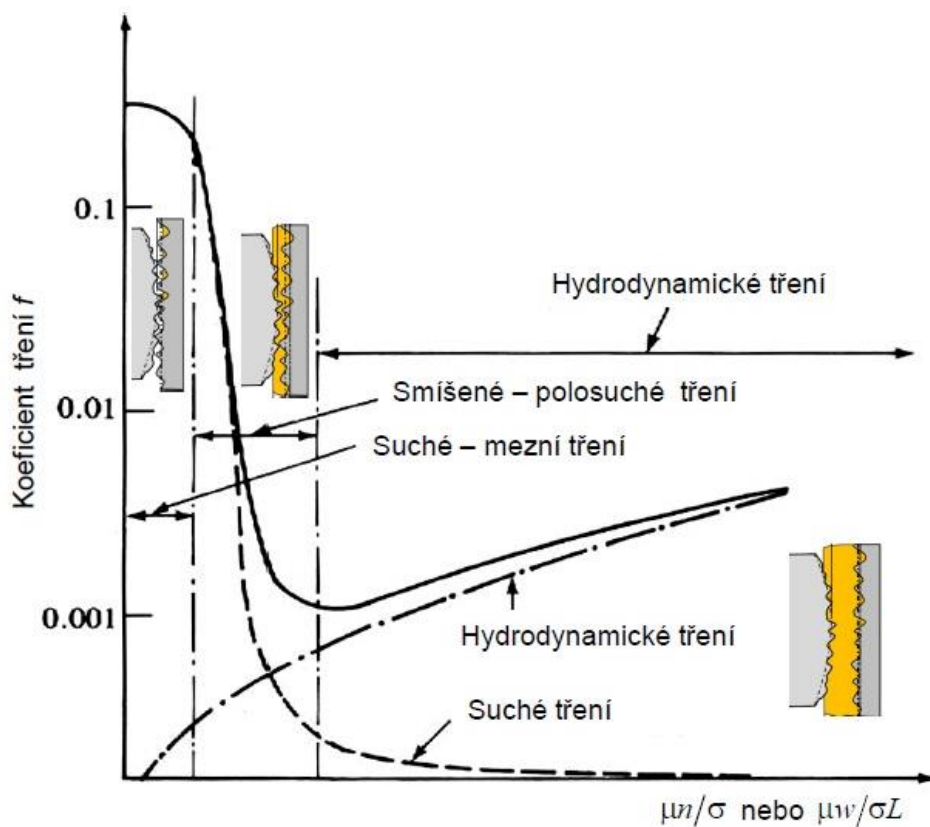
$$f = \frac{F_T}{F_N} = [-] \quad (2)$$

Součinitel tření lze také obecně popsat rovnicí:

$$f = \alpha \cdot f_s + (1 - \alpha) \cdot f_L \quad (3)$$

f_L [-]	součinitel kapalinného tření
α [-]	podíl suchého tření
f_s [-]	součinitel suchého tření

S nejznámějším grafickým popisem tření přišel prof. Stribeck, který experimentálně zjistil křivky chování tření v závislosti na vzájemné rychlosti a různých kontaktních tlacích mezi třecí dvojicí. Stribeckův diagram popisuje závislost tření „ f “ na bezrozměrném parametru $\frac{\mu n}{\sigma}$, kde μ [Pa.s] značí dynamickou viskozitu, n [min⁻¹] jsou otáčky hřídele a σ [Pa] je tlak. Tento bezrozměrný parametr je převrácenou hodnotou Somerfeldova čísla. U kluzného posuvného ložiska platí předpis $\frac{\mu U}{\sigma b}$, kde U [m.s⁻¹] značí vzjemnou relativní rychlost a b [m] je rozměr ve směru posuvu. [1] [19]



Obr. 4 Stribeckova křivka [4]

Velikost třecích ztrát vychází přímoúměrně z velikosti součinitele tření. Z diagramu je patrné, že součinitel tření v oblasti smíšeného tření klesá do doby, než se začne unášet

větší množství oleje. Poté díky zvyšující se vzájemné rychlosti a větší vrstvě oleje, ve které vzniká vnitřní tření, začne součinitel růst. Tření v tribologickém systému lze klasifikovat způsobem kontaktu mezi pozorovanými povrchy na suché, mezné, kapalinné a smíšené. [1]
[19]

1.4.1.1 Suché tření

Neboli také tření tuhých těles nastává při přímém kontaktu materiálových oblastí, kdy nejsou tělesa mazána nebo jsou, ale vůči sobě se pohybují pouze malou rychlostí (rozběh a zastavení daného mechanismu). Tento typ tření lze dále dělit na deformační a adhezivní. Deformační tření (čistě tření tuhých těles) nastává především ve vakuu a má mechanický charakter. U tření v adhezivní vrstvě se více projevuje chemický charakter materiálů. V důsledku suchého tření dochází k velkému opotřebení a mechanickým ztrátám. [19]

1.4.1.2 Mezné tření

Toto tření vzniká na přechodu mezi tuhým tělesem a blízkým okolím, kdy již existuje velmi tenká vrstva fyzikálně nebo chemicky adsorbovaných molekul plynu, kapaliny nebo látky vytvořené chemickou reakcí povrchů. U fyzikální adsorpce proces probíhá téměř po celém povrchu. Zde adsorbce roste s tlakem a klesá s rostoucí teplotou. Hlavní roli při fyzikální adsorbci hraje kvalita povrchu, složení materiálu už tolik ne. [19]

Samotné chemické adsorbci předchází adsorbce fyzikální. Během chemické adsorpce děj probíhá hlavně na nerovnostech povrchu. Zde adsorpce také s tlakem roste až do vyplnění nerovností, poté se ustaluje. Oproti fyzikálnímu způsobu však s teplotou roste až do maxima, a následně klesá. [19]

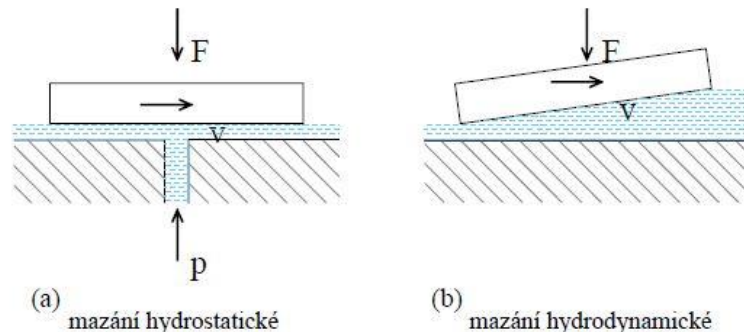
K meznému tření dochází při nedostatečném přívodu maziva nebo v případě, kdy není vrstva maziva dostatečně únosná. Tento stav má za následek skoro bezprostřední styk třecích ploch, kterému brání už jen film polárních molekul maziva s vysokou přilnavostí k povrchu

(tzv. mezní vrstva maziva). V praxi vzniká mezní tření na malých stykových plochách mezi drsnými povrchy, malými smykovými rychlostmi a pod zatížení velkými tlaky. [19]

1.4.1.3 Kapalinové tření

Teprve při kapalinovém tření se docílí dokonalého oddělení třecích ploch a nevzniká tak téměř žádné opotřebení. Zde se mezi třecími povrchy vytváří souvislá vrstva maziva, která vyrovnává i ty nejvyšší výstupky na obou površích a vlastním tlakem ruší účinek kolmého zatížení. Druhý faktor je však závislý na dostatečné rychlosti pohybujících se součástí, kde lze protitlaku dosáhnout dvěma způsoby, a to hydrostaticky nebo hydrodynamicky. [1] [19]

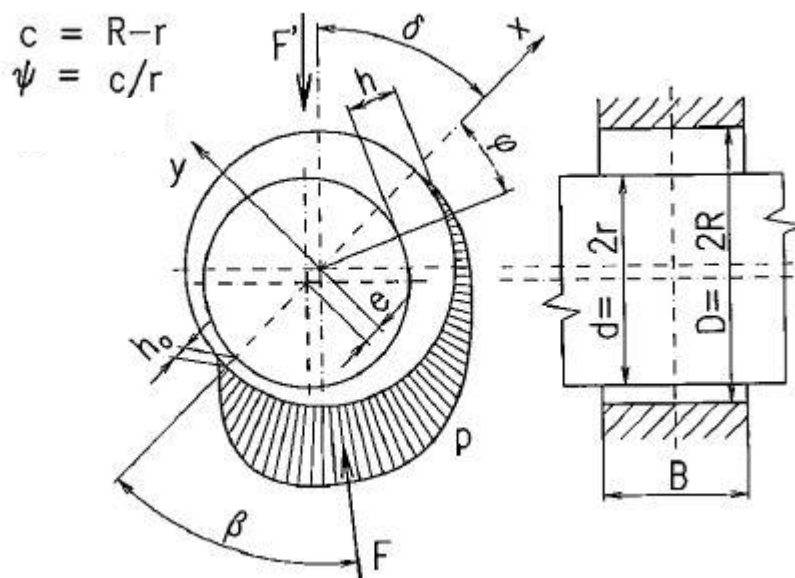
Při hydrostatickém mazání je nutno přivádět mazivo pod tlakem přímo do mezery mezi zatížené plochy. Zde je tlak vytvářen mimo třecí soustavu, nikoliv samočinně, a tedy není potřeba takové vysoké vzájemné rychlosti. U hydrodynamického mazání je však potřeba zajistit správnou funkci mazání nakloněním třecích povrchů o určitý úhel (například excentricita os čepu a pánve kluzného ložiska). Takto vznikne při pohybu maziva do klínovité mezery dostatečný tlak, který zajistí jejich dokonalé oddělení. [1] [19]



Obr. 5 Schematický rozdíl vytvoření tlaku v kapalině [19]

V obou podmínkách je tedy třecí síla závislá jen na velikosti vnitřního tření ve vrstvě maziva, které naopak se zvyšující se rychlostí roste. V současnosti se ve spalovacích motorech HD mazání využívá převážně mezi dvěma válcovými povrchy. Mezi těmito součástmi musí být mezera a určitá excentricita. Takto vzniká klínová mezera chovající se při dostatečné vzájemné rychlosti jako pumpa, která do sebe tlačí olej o patřičném tlaku a vytváří tak olejem dokonale oddělené povrchy. [1] [19]

Vznik tohoto hydrodynamického tlaku v klínové mezeře je matematicky popsán Reynoldsovou ložiskovou rovnicí (4). Čím větší je vytvořen v mazivu tlak p_h , tím je únosnost ložiska vyšší. První člen na pravé straně rovnice představuje vliv zužující se spáry během rotace čepu. Druhý člen vyjadřuje vliv změny tloušťky spáry s časem. [1]



Obr. 6 Schéma klínové mezery mezi čepem a pánví radiálního HD ložiska [1]

e [mm]	excentricita čepu
r [mm]	poloměr čepu
R [mm]	poloměr pánve ložiska
c [mm]	ložisková vůle
ψ [-]	relativní ložisková vůle

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(H^3 \cdot \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} \right) + \left(\frac{D}{B} \right)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left(H^3 \cdot \frac{\partial \Pi}{\partial \xi} \right) = 6 \cdot \left[\frac{\partial H}{\partial \varphi} + \frac{2}{\omega} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \right] \quad (4)$$

D [mm]	průměr pánve kluzného ložiska
H [mm]	bezrozměrná tloušťka spáry

$$H = 1 + \varepsilon \cdot \cos \varphi = [-] \quad (5)$$

ε [-]	relativní excentricita
-------------------	------------------------

$$\varepsilon = \frac{e}{c} \quad (6)$$

Π [-]	bezrozměrná tlaková funke pro stacionární kluzné ložisko
-----------	--

$$\Pi(\varphi, \xi) = \frac{p_h \cdot \psi^2}{\nu \cdot \omega_{\xi}} = [-] \quad (7)$$

p_h [Pa]	hydrodynamický tlak ve vrstvě pod čepem kluzného ložiska
ν [mm ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita maziva
ω_{ξ} [rad.s ⁻¹]	úhlová rychlost čepu

φ [-]	bezrozměrná souřadnice pro zjednodušení výpočtu
---------------	---

$$\varphi = \frac{x}{R} \quad (8)$$

x [mm]	souřadnice posunutí ve směru osy x
----------	------------------------------------

ξ [-]	bezrozměrná souřadnice pro zjednodušení výpočtu
-----------	---

$$\xi = \frac{y \cdot 2}{B} \quad (9)$$

y [mm]	souřadnice posunutí ve směru osy y
----------	------------------------------------

B [mm]	šířka ložiskového pouzdra
----------	---------------------------

1.4.1.4 Smíšené tření

Vzniká při nedokonalém oddělení ploch vrstvou maziva, kde dochází k bezprostřednímu styku jejich nerovností. Vrstva maziva mezi povrchy je menší než minimální potřebná k zajištění kapalinového tření, ale stále větší než film, který zajišťuje mezní tření. K takovému stavu dochází především při velkém zatížení a malé smykové rychlosti, přičemž u mazání kapalinou s nízkou viskozitou hraje hlavní roli mikrogeometrie stykových plošek. [1] [19]

1.4.2 Opotřebení

Přímým důsledkem tření po určitém čase je kromě mechanických ztrát a tvorby tepla i opotřebení kontaktní dvojice. Toto opotřebení se v tribologii dělí na šest typů, které jsou většinou ještě vzájemně zkombinovány a vznikají tak následkem opotřebení jiného. [1]

1.4.2.1 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení nastává nejčastěji při kontaktu dvou těles s rozdílnou tvrdostí povrchu. Část povrchu měkčího materiálu je tvrdými a ostrými částicemi druhého materiálu rozrývána. K tomuto jevu může dojít i při vniknutí tvrdých nečistot mezi dotýkající se povrchy, kde jejich pohyb po površích způsobí rýhy a následné zvětšení tření. [1]

1.4.2.2 Adhezivní opotřebení

Tento druh opotřebení nastává, když se dva povrchy nachází ve fázi suchého nebo smíšeného tření a vytváří těsné adhezivní spojení. Při tomto typu opotřebení nastává tzv. čistě kovový styk, kdy dochází k poruše povrchových vrstev těles. V důsledku zahřívání vznikají a vzájemným pohybem součástí zanikají mikrosvary (vylomením). Toto může být následkem použití stejného složení materiálů na površích součástí či při použití kombinace materiálů, které mají silnou tendenci k vzniku čistě kovového styku. Tvorba mikrosvarů se dá poměrně jednoduše eliminovat použitím nějakého maziva mezi oba kontaktní povrchy. [1]

1.4.2.3 Únavové opotřebení

Vzniká opakovaným (pulzujícím nebo mívivým) mechanickým či hydraulickým zatížením vedoucím k tvorbě a šíření prasklinek pod povrchem s následným poškozením povrchu za vzniku prasklin a jamek. Pokud je povrch zatížen třením, lze toto opotřebení snižovat zároveň se snižujícím se koeficientem tření. U hydraulických součástí po vzniku únavových prasklin dochází k rozšiřování poškození za účasti kavitačního a erozivního opotřebení. Při hydraulickém zatížení je tvrdost a elasticita materiálu tedy zásadní. [1]

1.4.2.4 Kavitační opotřebení

Ke kavitačnímu opotřebení dochází během poklesů tlaku proudící kapaliny v momentě, kdy narazí na překážku (zúžení, ostrá hrana). Při tomto tlakovém poklesu vznikne v kapalině dutina, která se zaplní párou. Jakmile je překážka překonána, tlak se změní zpět a dojde

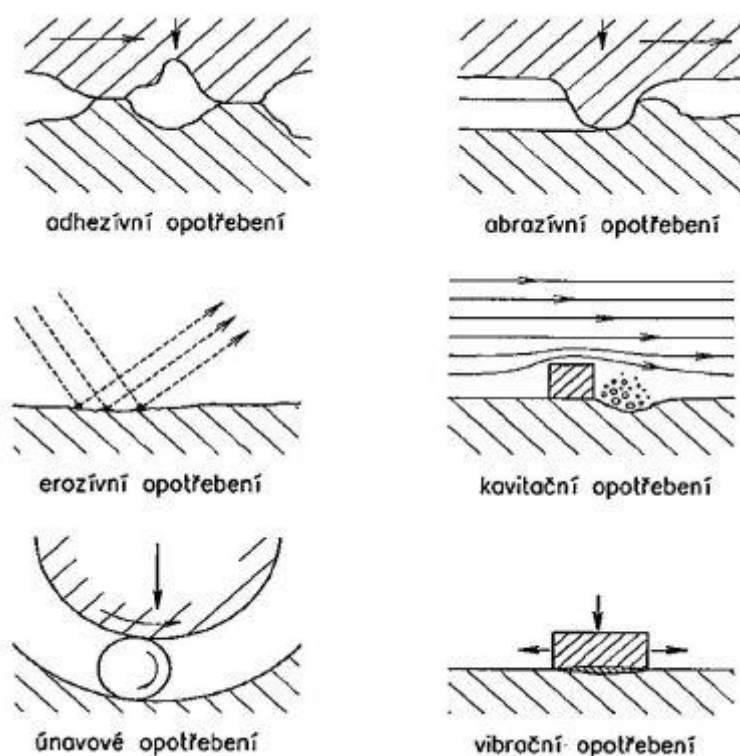
k rázu, který vyvolá deformaci. Postupem času se povrch tělesa naruší mikrotrhlinkami a začne docházet k uvolňování částic. [1]

1.4.2.5 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení vzniká při kapalinovém nebo plynném mazání součástí, kdy jsou při proudění dané tekutiny unášeny drobné částičky po kontaktním povrchu. Tyto částice mohou při pohybu vytvářet malé rýhy a prohlubně, které se mohou zvětšovat a vytvářet tak na povrchu nerovnoměrné opotřebení. [1]

1.4.2.6 Vibrační opotřebení

Pokud součásti při zatížení konají vzájemný opakovaný tangenciální pohyb o malé amplitudě, hovoří se o vibračním opotřebení. Produkty tohoto opotřebení mají zbarvení podobné korozi, proto bývá často zaměňováno za výsledek korozního působení. Tyto vzniklé částice dokáží porušit i materiály s velmi tvrdou povrchovou vrstvou. [1]



Obr. 7 Způsoby opotřebení [1]

2 Současná technologická a konstrukční řešení pro snížení mechanických ztrát v pístových spalovacích motorech

Před samotným popisem jednotlivých řešení je nejdříve potřeba vyjmenovat všechny sledované části motoru. Obecně lze konstrukci čtyřdobých zážehových a vznětových pístových spalovacích motorů rozdělit do několika základních skupin.

Pevné, tedy nepohyblivé části motory, kam patří:

- blok motoru a vložky válců
- kliková skříň
- hlava válců a spodní víko motoru
- sací a výfukové potrubí.

Dále pohyblivé části motoru, mezi které řadíme:

- klikový mechanismus tvořený pístní skupinou (píst, pístní kroužky, pístní čep), ojnicí, klikovým hřídelem a setrvačником
- mechanismus rozvodů.

A ostatní části a systémy:

- palivová soustava (vstřikovací soustava, karburátor, palivové čerpadlo atd.)
- zapalovací systém
- chladicí a mazací okruhy
- a další.

Z těchto skupin se na mechanických ztrátách podílejí nejvíce následující oblasti (Obr. 1):

- vložka válce – plášť pístu a pístní kroužek
- velké a malé ojnicí oko, tedy spojení pístní čep → ojnice → kliková hřídel
- kliková hřídel a kluzná ložiska
- vačkové hřídele s vahadly

- dříky ventilu
- mechanismy turbodmychadel apod.
- vstřikovací jednotky
- olejová, palivová a vodní čerpadla
- rozvody
- výměna náplně ve válcích (hladkost stěn potrubí atd.) [2]

2.1 Mazivo

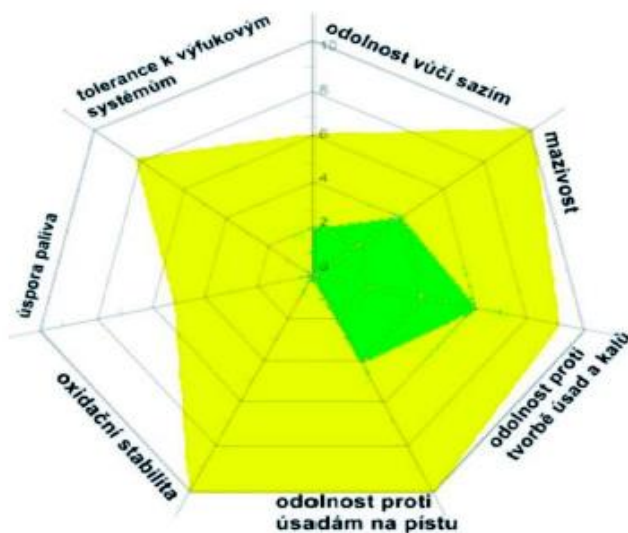
Hlavním způsobem, kterým se redukuje třecí ztráty a především se zcela předchází okamžitému opotřebení, je mazání motorovými oleji. Mazání olejem je zcela logické a v motorech se používá odjakživa. Jedním z hlavních úkolů mazacího oleje je snižování tření, ať za účinků mezného či smíšeného mazání. Ideální kapalinové tření, při kterém se vytváří dostatečná vrstva maziva zcela oddělující kontaktní plochy, je však v reálných podmínkách, především při rozběhu a doběhu motoru, nedosažitelné. Mezi další úkoly olejové vrstvy patří i chlazení součástí jako jsou vysoce tepelně namáhané písty nebo ložiska, odvod nečistot z kontaktních ploch (otěr a spalování), dotěsnění spalovacího prostoru, konzervace povrchů a tlumení vibrací. [2] [3]

Vlastnost, která nejlépe charakterizuje chování oleje, je jeho viskozita, jež vyjadřuje míru vnitřního tření. Pokud je viskozita příliš velká, olej špatně teče a způsobuje tak překážku, kterou je třeba překonat. Tím vznikají v pohonné jednotce větší mechanické ztráty, je omezen průchod oleje součástí a zvyšuje se jeho provozní teplota. Navíc se v oleji vytváří více úsad a má horší chladicí a čistící účinky než méně viskózní oleje. Pokud má olej naopak viskozitu příliš nízkou, vzniká podstatný problém ve snížení mazací schopnosti se zhoršenou schopností udržení olejového filmu na povrchu součástí. Chladicí a čistící účinky jsou však mnohem lepší. [3]

Výše viskozity je u všech olejů spojena s momentální teplotou maziva, kdy má s rostoucí teplotou tendenci klesat. Tato závislost se liší dle typu oleje, kde je pro motor nejvhodnější, aby viskozita v celém rozsahu teplot byla přinejlepším stejná a olej měl tím pádem zaručené

dobré mazací schopnosti i při vysoké teplotě. Navíc olej nesmí při studených startech (hlavně během zimy) klást příliš velký odpor. Pro takové použití se zejména hodí plně syntetický olej, který je však dražší než olej minerální. [3]

Do motorových olejů se kromě samotného oleje přidávají ještě aditiva ovlivňující jeho vlastnosti a kvalitu. Tato aditiva ovlivňují například viskozitní index, mazací schopnosti, životnost, antikorozi vlastnosti, protiotěrové vlastnosti atd. Přísady, které vytváří stálý olejový film na povrchu mazané součásti pomocí adsorpčních sil, se nazývají modifikátory tření. Modifikátorů tření je celá řada. Mezi nejznámější patří ZDDP, složením zinkový dialkyldithiofosfát a MoDTC, složením molybden dithiokarbamat [7] [9]. Použití těchto modifikátorů se jeví jako snadný způsob návrhu velmi účinné pohonné jednotky. Bohužel jako u všech řešení se i zde musí hledět na ekologické předpisy. Ty jsou velmi přísné ohledně složení olejů nehledě na prodlužování intervalů výměny oleje z 15 000 na 30 000 km při stále větším zatížení vyplývající z přeplňování a downsizingu. Vzhledem k tomuto stavu jsou vyráběny tzv. long life oleje, které jsou na takovéto zatížení konstruovány. Jejich ochranné a mazací schopnosti jsou však na samém okraji kladených požadavků. [10]



Obr. 8 Diagram vývoje maziva, kde zelená oblast značí olej z r. 1997 a žlutá z r. 2012. [10]

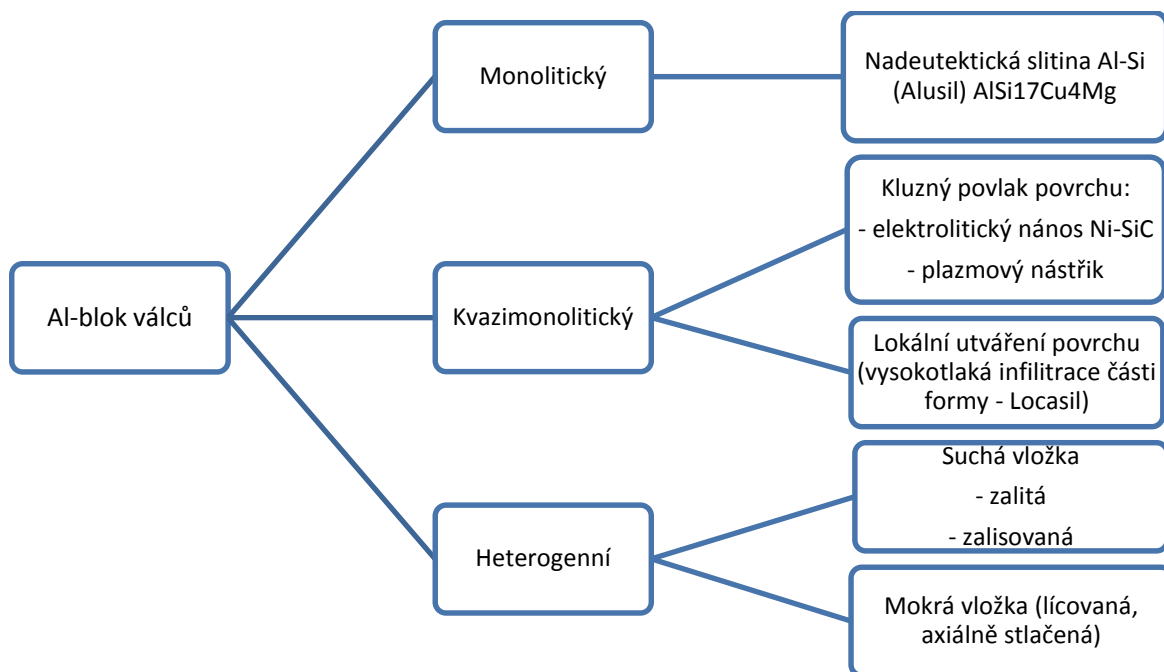
2.2 Materiálové složení spalovacího motoru

Materiálů používaných v konstrukci spalovacích motorů je spousta a další stále přibývají. Podrobné popsání materiálového složení jednotlivých komponent by tedy samo vydalo na rozsáhlou publikaci. Proto je dále popsán jen blok motoru, který má hlavní podíl na vznik mechanických ztrát díky vedení pístu ve válci. Blok motoru je navíc hlavní oblastí, kde se dá značně ušetřit na konečné hmotnosti vozidla.

2.2.1 Blok motoru

Klasickým materiálem odléváných bloků pro vznětové motory byla kdysi šedá nebo vermikulární litina, jak v monolitickém, tak i heterogenním provedení s mokřými vložkami. Pro zážehové jednotky se prosadily hliníkové bloky válců, u kterých musela být řešena technologie tření na kluzném povrchu válce. Hlíník totiž nevyniká zrovna nejlepšími tribologickými vlastnostmi. Ve prospěch šedé litiny mluví hlavně její vysoká pevnost, tuhost a nízká tepelná roztažnost, v neprospěch hlučnost provozu a slabší tepelná vodivost. Pevnost a protihlukové vlastnosti konstrukce bloků z hliníkových slitin lze zlepšit vytvořením důkladného vnějšího žebrování. [5]

V dnešní době se kvůli úspoře hmotnosti (40-60 %) odlévají bloky motoru hlavně z hliníkových slitin pro zážehové i vznětové motory. Jak již bylo zmíněno, tření ani tvrdost na povrchu těchto slitin není zrovna ideální. Výrobci pohonných jednotek tedy přišli s různými řešeními vyznačených v obrázku (Obr. 9). [5]



Obr. 9 Schéma rozdělení hliníkových bloků motorů (vlastní zpracování) [5]

U nových motorů s vrtáním válce cca do 110mm jsou použity technologie vytvářející kluznou plochu válce přímo v materiálu bloku (monolitické a kvazimonolitické provedení). V heterogenním provedení se používají hliníkové bloky v kombinaci se zalitými (případně zalisovanými) vložkami o tloušťce 1,5 mm ze šedé litiny. [5]

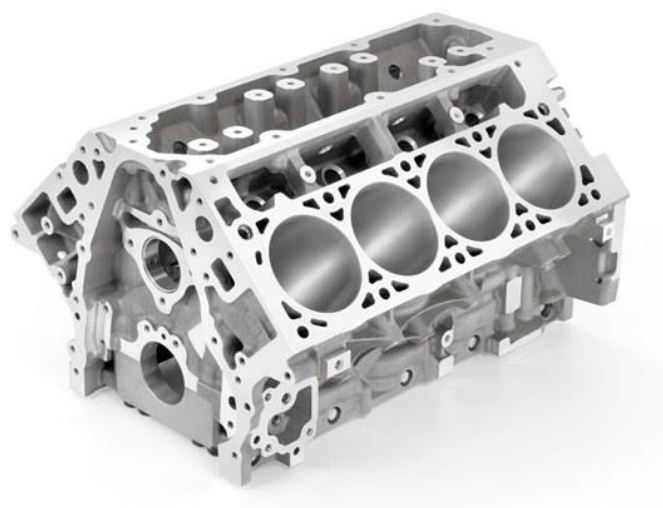
Na motory s vrtáním větším jak cca 110 mm se používají tzv. mokré vložky o tloušťce stěny 5 až 8 mm. Mokré vložky jsou do bloku vloženy způsobem, který umožní po vnějším obvodu proudit chladicí kapalinu, a tak je velmi účinně chladit po celé jejich ploše. Mokré vložky byly dříve používané u motorů Škoda a Fiat, nyní se však od jejich použití upouští. [21] [22]

Monolitické provedení Alusil je vzhledem k nadeutektoidnímu složení nutno odlévat do kokil pod nízkým tlakem. Použitelnost tohoto provedení je tedy hlavně ve středních sériích (osmi a dvanáctiválcové motory), kde se méně hledí na cenu. Tribologické vlastnosti Alusilu a Silumalu způsobené obsahem křemíku jsou však velmi dobré. [5]

U kvazimonolitického provedení (např. Locasil) jsou do formy před samotným odléváním vloženy pórovité vložky z křemíku. Křemík je po odlití pod vysokým tlakem infiltrován

do povrchu válce, kde vznikají na kluzných plochách skoro stejné pevnostní a tribologické vlastnosti jako u provedení Alusil. Sériovost a výrobní cena použití této technologie se jeví jako mnohem lepší, hlavně z důvodu možnosti vysokotlakého lití levné hliníkové slitiny. Technologie kvazimonolitického provedení je již zvládnuta, ale širší použití ve velkých a středních sériích zatím nenašla. Příklad použití metody Lokasil lze nalézt u firmy Porsche a jejich motoru M96 v modelu Caymann. Koncept Alusil našel uplatnění v motorech 4,8L V8 FSI pro model RS4 od firmy Audi. [29] [54]

U heterogenního provedení jsou bloky, do kterých se následně odlévají nebo zalisovávají vložky, opět tvořeny hliníkovou slitinou. Vložky mohou být litinové, ocelové a při použití stísněného lití i z Alusilu či sintrovaných slitin (slisování Al prášku a prášku tvořeným nekovovými částicemi). [5]



Obr. 10 Monolitický blok osmiválového motoru LT1 od firmy Corvette [23]

2.3 Povrchové úpravy součástí spalovacího motoru

V následujících kapitolách jsou popsány některé z dostupných a používaných technologií pro úpravu povrchů komponent v motoru. Všechny tyto metody mají za následek zlepšení mechanické odolnosti, otěruvzdornosti a hlavně snížení koeficientu tření. Na závěr

je vyzdvihnuta novodobá technologie tvorby tenkých DLC vrstev včetně podrobné charakteristiky procesu.

2.3.1 Chemické povrchové úpravy

2.3.1.1 Fosfátování

Fosfátování patří mezi nejvíce používané metody chemických úprav povrchů. Během fosfátování se na upravovaném povrchu utváří souvislá vrstva nerozpustných fosforečnanů, která je zakotvená k povrchu součásti. Výsledná vrstva je porézní, tvořena krystalickými fosforečnany. Vrstva má vysokou nasákavost olejem, hlavně při obsahu manganu. Nepoužívá se jako konečná úprava. [16]

Aplikaci nachází v konstrukci spalovacích motorů vytvořením fosforečnanu manganatého za účelem zlepšení záběhu pístu a pístních kroužků. Tato fosfátová vrstva vyniká také v přilnavosti grafitové vrstvy k povrchu pláště pístu. [16] [18]

2.3.2 Elektrochemické (galvanické) povrchové úpravy

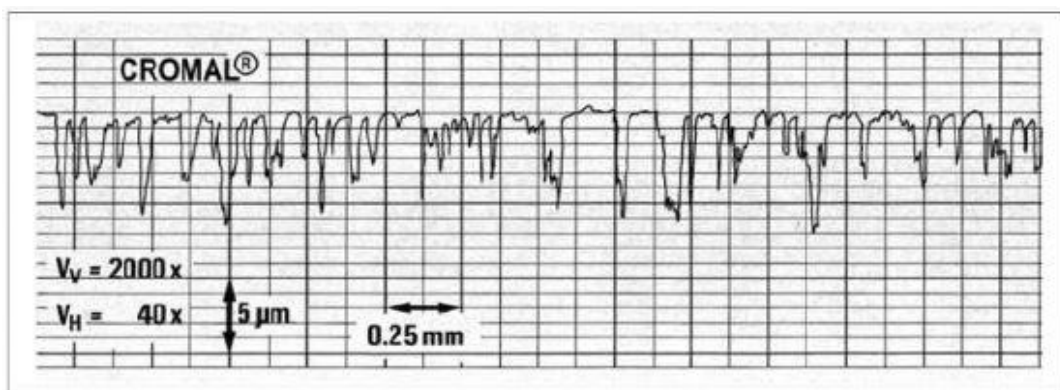
Galvanické vylučování kovů a slitin za účinků elektrolýzy je již dlouhou dobu známá technologie povrchové úpravy základního materiálu. Rozlišujeme ji na galvanoplastiku, která spíše jen vzhledově pokovuje materiály, a na galvanostegii vytvářející velmi tenké povlaky s určitými vlastnostmi jako jsou antikorozivní odolnost a odolnost proti nadměrnému opotřebení. [16] [24]

2.3.2.1 Tvrdé porézní chromování (Cromal)

Cromal je významná a rozsáhle používaná povrchová úprava na určitých součástech. Životnost takto upravené součásti je až dvacetkrát delší. Základním materiálem chromované součásti mohou být litiny, ocelolitiny, ocel a některé typy nerezů. Na tento materiál je poté elektrochemickým procesem nanесena tvrdá vrstva chromu o tloušťce 0,06 až 0,08 mm. Pro snížení opotřebení chromové vrstvy a pístních kroužků je na povrchu vytvořen speciální

tvár, který pomáhá rozvádět a udržovat vrstvu oleje na povrchu. Vlastnosti vrstvy mohou být během pokovování zhoršeny v důsledku vznikajícího vodíku v lázni, který způsobuje křehnutí vrstvy a vznik trhlinek. Mezi výhody povrchové úpravy Cromal patří vysoká tvrdost (66-77 HRC), nízký koeficient tření, dobrá odolnost proti opotřebení a velmi dobré antikorozi vlastnosti. [16] [18]

U válců v bloku motorů se jako dokončovací operace používá třístupňové honování a nakonec lapování. Na ostatních součástech je prováděno dvoustupňové broušení. Největší nevýhodou při galvanickém chromování je bezesporu dopad na zdraví pracovníků. Ti se na pracovišti musí potýkat s šestimocnou chromovou sloučeninou, která je řazena mezi toxické a karcinogenní látky. Způsobuje kožní vředy a usazuje se na plicích, kde má na svědomí vážné onemocnění dýchacích cest. [16] [18]



Obr. 11 Profil drsnosti vrstvy CROMAL® [17]

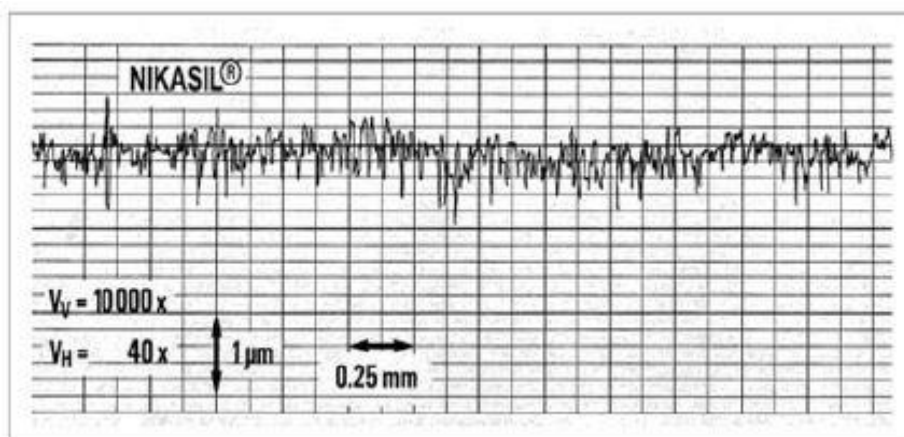
2.3.2.2 Galvanické niklování (Nikasil a Galnikal)

Při této technologii je na stěnách válců galvanicky vytvořena tenká vrstva sloučeniny niklu a karbidu křemíku. Jeden z hlavních problémů nastává při provozu motoru na krátké vzdálenosti s méně kvalitním benzínem obsahující vysoké procento síry. Na horní stěně válců dochází k degradaci povrchu, která má za následek kolísání volnoběžných otáček a špatné startování motoru. I tak je tato povrchová úprava aplikována v mnoha závodních

automobilech značek, jako jsou BMW (včetně motocyklů), Jaguar, Porsche apod. [16] [17] [18]

Základním materiálem jsou hliníkové slitiny (např. Silumin) odstředivě odlité do formy. Stěny válců jsou poté pokryty tenkou vrstvou nikl-křemíkového karbidu o tloušťce 0,065-0,075 mm, jejíž zanedbatelná tloušťka umožňuje zvětšit průměr pístu bez nutnosti změny rozměrů bloku motoru. Takto vzniklá vrstva přináší mírný nárůst výkonu díky sníženému tření mezi pístními kroužky a stěnou válce a navíc vyniká ideální těsnicí vlastností. Kvůli absenci grafitových jader a chybějící pórovitosti ve vrstvě je zapotřebí vytvořit na výsledném povrchu strukturu, která umožní správné ulpívání olejové vrstvy. K tomu slouží několik stupňů honování vytvářející typicky šrafovanou strukturu povrchu (rotační a vertikální pohyb honovací hlavy). [16] [18]

Nikasil nachází uplatnění hlavně v závodních aplikacích a v motorech určených pro výkonné motocykly. Případně lze tuto technologii použít i k renovaci opotřeбенých válců, díky možnosti nanášení poměrně silných vrstev (0,25-0,5 mm). [16] [18]



Obr. 12 Profil drsnosti povlaku NIKASIL® [17]

2.3.2.3 Eloxování

Eloxování je jednou z nejvíce používaných metod povrchové úpravy hliníkových slitin. Technologie eloxování spočívá v anodické oxidaci hliníku na povrchu součástí za pomoci

uzavřeného elektrického obvodu. Tvrdá eloxovaná vrstva je na povrch aplikována ponorným procesem do lázně kyseliny sírové při působení DC proudu. Kvůli zlepšení vodivosti lázně je potřeba udržovat teplotu mezi -5 až $+5$ °C a intenzivně míchat. Takto vzniklé oxidové vrstvy jsou odolné proti opotřebení (tvrdé eloxované 500 až 800 HV při tloušťce 0,025-0,150 mm) a jsou stálé i za vyšších teplot (až 300 °C). Navíc se zlepšují kluzné vlastnosti a vytvářejí se na povrchu póry nutné k udržení olejového filmu. Konečná drsnost povrchu velmi závisí na kvalitě původního povrchu, proto se plochy válců musí honovat na požadovanou drsnost s pomocí tvrdých diamantových nebo CNB brusných tělísek a kotoučů. [16] [18]

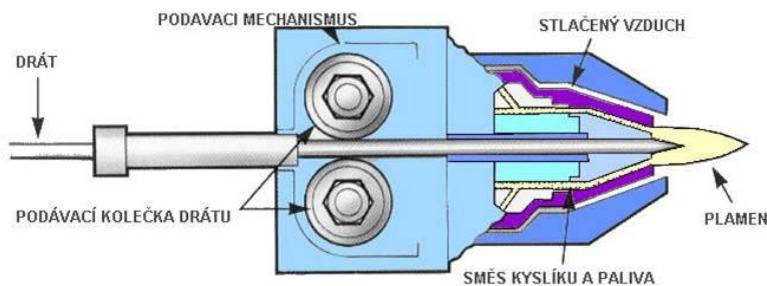
Aplikace tvrdého eloxování se v dnešní době provádí například na pístech vznětových motorů s přímým vstřikem paliva, kde jinak díky teplotním šokům vznikají únavové trhlinky. Další použití je na pracovních plochách válců (Ducati) nebo na povrchu drážky prvního pístního kroužku. [16] [18] [20]

2.3.3 Termické nástřiky (tepelné naprašování)

Tepelné naprašování představuje velmi perspektivní technologii hlavně proto, že dochází k optimálnímu přizpůsobení povrchových vlastností součástí provozním podmínkám. To má za následek delší životnost a vyšší spolehlivost. Způsobů tepelného naprašování je mnoho. Vždy se však jedná o tepelně mechanický proces, během kterého dochází k natavení přídavného materiálu do formy malých částic. Částicím je dodána dostatečná kinetická energie, díky které je materiál přenesen na připravený povrch. Zde se vytvoří požadovaný kvalitní a odolný povlak. [25] [26]

2.3.3.1 Termický nástřik plamenem

Jedná se o nejstarší způsob termického nástřiku, kde je jako zdroj tepla použit kyslík s palivem (např. acetylen). Přídavný materiál je ve formě drátu tlačěn doprostřed plamene, kde se taví a je jeho dynamickými účinky unášen na povrch součásti. [25] [26]



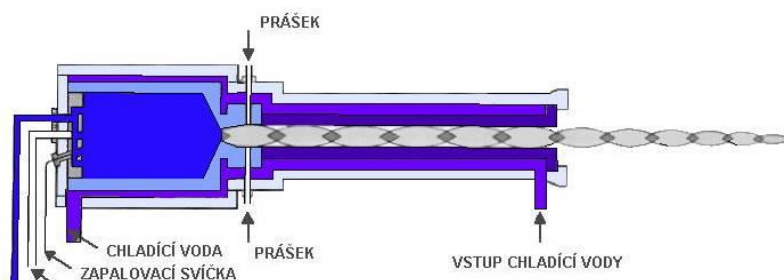
Obr. 13 Termický nástřik plamenem [27]

2.3.3.2 Termický nástřik detonací

Funguje na principu využití tepelné a kinetické energie vzniklé po zapálení plynu v uzavřené spalovací komoře. Do spalovací komory je přiváděn přídavný materiál ve formě prášku spolu s hořlavým plynem (acetylen) a kyslíkem a je zapalován. Zapalování směsi probíhá opakovanými výboji zapalovací svíčky. Teplota nataveného materiálu se pohybuje kolem 3500 °C a rychlost dopadu částic je až 800 m·s⁻¹. Proces se cyklicky opakuje s frekvencí 3 až 5 Hz, kdy se spalovací komora po každém cyklu vyplachuje proudem dusíku. Díky vysoké teplotě tavení lze používat i těžko tavitelné materiály, kerými jsou například cermety. [25] [26]

2.3.3.3 HVOF nástřik

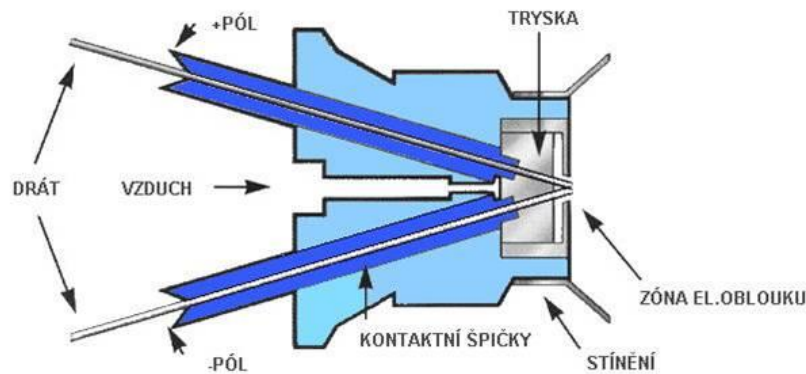
HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) metoda spočívá ve vysokorychlostním nástřiku nataveného materiálu na povrch součásti. Palivo (acetylen atd.) s kyslíkem se ve speciální trysce urychlí na supersonickou rychlost (až Mach 2) a za tryskou je kontinuálně přiváděn materiál ve formě prášku. Natavený materiál je tak vysokou rychlostí unášen plamenem na povlakovaný materiál. Ze všech technologií termických nástřiků se právě metoda HVOF jeví jako nejlepší náhrada zdraví škodlivého tvrdého chromování. [25] [26]



Obr. 14 Princip HVOF metody [27]

2.3.3.4 Termický nástřik elektrickým obloukem

U této technologie vzniká tepelná energie pomocí elektrického oblouku, který se tvoří mezi dvěma dráty přídavného materiálu. Chybějící kinetickou energii k přenosu nataveného materiálu na povlakovaný povrch získáme z proudu stlačeného vzduchu. [25] [26]

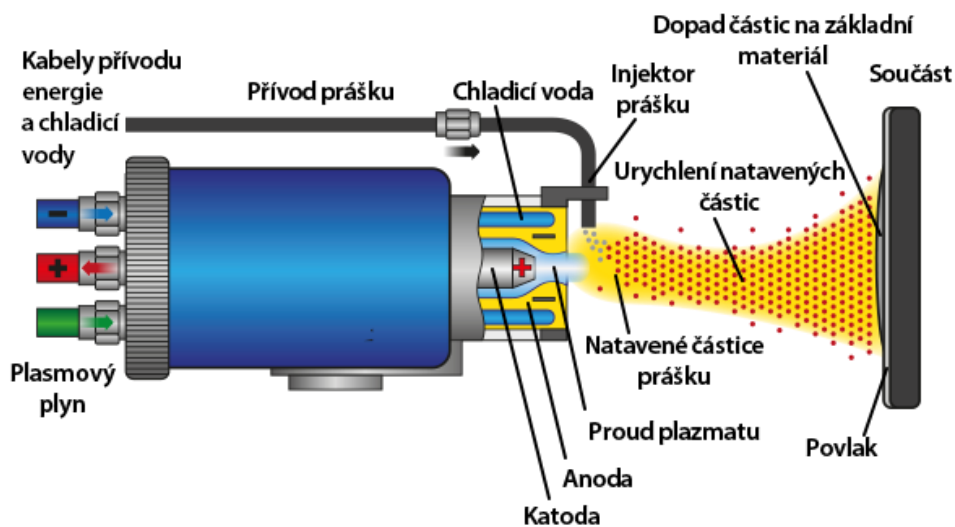


Obr. 15 Termický nástřik elektrickým obloukem [27]

2.3.3.5 Termický nástřik plazmou

Princip plazmatického nástřiku spočívá ve vytvoření elektrického oblouku mezi wolframovou katodou a měděnou anodou tvořící výstupní trysku. Oblouk hoří v plazmovém plynu, který tvoří argon (inertní plyn) a pár procent příměsí plynu, který dokáže zvýšit entalpii plazmatu (He, N₂, apod.). Na konci trysky vystupuje plazmový plamen s teplotou až 20 000 °C, do kterého se přivádí přídavný materiál ve formě prášku. [25] [26]

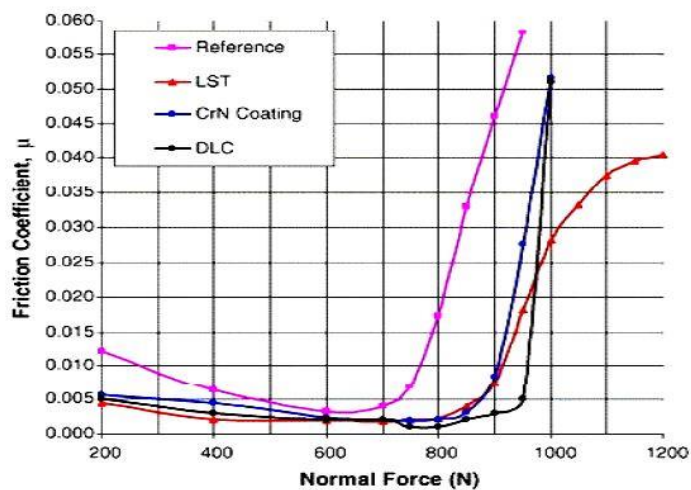
Výhodou je možnost tavit veškeré druhy materiálů díky velmi vysoké teplotě. Uplatnění tedy najde hlavně v nástřicích keramiky a cermetů. Nevýhodou je nežádoucí oxidace natavených částic materiálu. Za pomoci vakuových metod jako jsou VPS (Vacuum Plasma Spraying) a LPPS (Low Pressure Plasma Spraying) s tlakem 0,005 až 0,02 MPa nebo v komoře s inertním plynem, lze však dosáhnout úplné absence zoxidovaných částic. Povlaky se vyznačují velmi jemnou strukturou, vysokou přilnavostí a hustotou mezi 95 až 99 %. [25] [26]



Obr. 16 Prinip plazmatického nástřiku [28]

2.3.4 Texturování povrchu pomocí laseru (LST)

Metoda LST (Laser Surface Texturing) spočívá ve vytváření mikro důlků laserem, případně různých speciálních tvarů (trojúhelníky apod.). Tato technologie nijak nepřispívá ke zlepšení fyzikálních ani mechanických vlastností povrchu součásti. Místo toho však slouží k lepšímu zachycování oleje ve vytvořených mikrodůlcích (olejových kapsách). Z grafu je patrné, že technologie LST již jen díky principu texturování povrchu značně snižuje koeficient tření. Hlavní uplatnění LST v motoru se v současnosti nachází hlavně v pístní skupině. [12] [30]



Obr. 17 Graf porovnávající závislosti průměrných hodnot součinitelů tření na normálové síle [31]

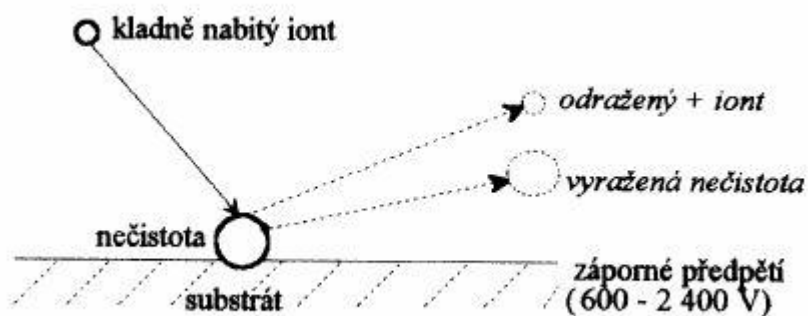
2.3.5 DLC (Diamond Like Carbon) a nano-strukturné vrstvy

Tyto velmi tenké vrstvy díky svým jedinečným vlastnostem nacházejí stále širší oblast využití napříč všemi odvětvími průmyslu. V závislosti na materiálovém složení vrstvy a prostředí využití vynikají velmi nízkým koeficientem tření, velkou tvrdostí a chemickou stálostí. Díky této kombinaci vlastností se stal vývoj tenkých vrstev cílem mnoha vědeckých skupin po celém světě. Velmi zajímavou aplikací jsou také elektricky vodivé průhledné vrstvy (SnO_2 , ZnO atd.), které s pomocí Joulova tepla dokáží vyhřívat sklo (například čelní sklo u automobilu). Pro účely práce jsou dále autorem probrány základy z teorie vytváření tenkých vrstev, jejich složení a možnost konkrétního využití na součástkách spalovacího motoru. [32] [33]

2.3.5.1 Depozice (tvorba) tenkých vrstev

Depozice vrstev se provádí jako zcela finální operace na mechanicky a tepelně upraveném povrchu součásti (substrátu). Pro zajištění správné adheze povlaku musí být povrch kovově čistý. Toho se nejdříve docílí pečlivým broušením od makronečistot. Poté je nutné očistit povrch od organických i anorganických nečistot například pomocí ultrazvukového chemického čištění či iontovým bombardem (etchingem). [32]

Čištění iontovým bombardem je založeno na odpařování kovové katody v procesním plynu, která uvolňuje kladně nabitě ionty na povrch substrátu. Na povrchu substrátu ionty předávají velké množství kinetické energie do nečistoty, která je tím vyražena. Nevýhodou bombardu může být například zničení povlakovaného nástroje, kvůli úbytku kobaltu v povrchu substrátu. Jelikož se technologie iontového bombardu používá už v depozičním zařízení,



Obr. 18 Grafické znázornění iontového bombardu [32]

nelze zjistit stav očištěného povrchu. Zjištění, že došlo k nechtěné změně v povrchu substrátu, tedy přichází až po nějaké době v praxi. [32]

2.3.5.2 Metody depozice tenkých vrstev

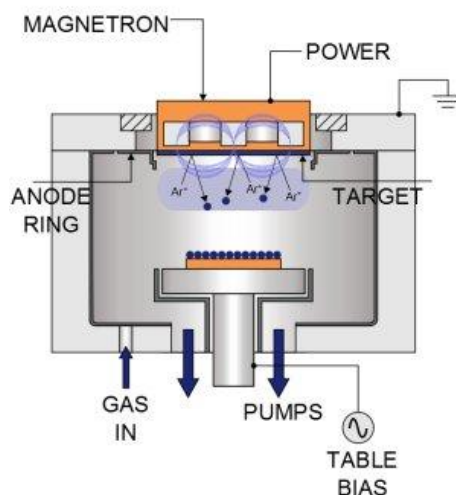
Existující metody lze rozdělit na dva základní druhy, a to fyzikální metodu PVD a chemickou metodu CVD. Hlavní odlišností jsou velmi rozdílné teploty při depozici a způsob přípravy vrstvy. Největší kvalitativní změnu v tvorbě tenkých vrstev přinesla technologie PACVD (Plasma Assisted CVD) nebo také PECVD (Plasma Enhanced CVD). Zde se plazmatickou aktivací docílilo snížení depozičních teplot až na 300 °C, zatímco princip CVD metody zůstal nezměněn. [6] [32]

2.3.5.2.1 Fyzikální metody PVD (*Physical Vapour Deposition*)

Princip spočívá ve vakuovém napařování nebo naprašování materiálu z terče, který bude součástí vrstvy (např. Ti, Si, Cr, Al...) a následném přilnutí k substrátu. Díky nízkým teplotám při depozici lze touto metodou vytvářet tenkou vrstvu i na velmi tenkých fóliích z plastů (PP, PE atd.), aniž by došlo k jejich tepelné degradaci. [6] [32]

Vakuové napařování probíhá při tlacích nižších jak 10^{-3} Pa, kdy se za pomoci ohřevu (odporový, anodický nebo třeba laserový) terče materiál odpaří. Takto odpařený materiál se v komoře volně šíří všemi směry a ulpívá na substrátu. Ten musí být v dostatečné vzdálenosti od zdroje par pro vytvoření rovnoměrné tloušťky deponované vrstvy v celém rozsahu povlakovaného povrchu. [6] [32]

Naprašování (sputtering), spočívá v odprašování povrchových atomů terče působením kinetické energie iontů plazmy dopadajících na jeho povrch. Odprašování probíhá díky iontovému dělu v tlacích kolem 1 Pa. Tímto způsobem je umožněno nanášet i materiály, které by se během ohřevu při napařování zničily (polymery apod). V současnosti nejpoužívanější metodou naprašování se jeví tzv. magnetronové naprašování (magnetron sputtering), kdy je tok iontů na terč i substrát usměrněn pomocí magnetického pole. Tím je eliminován rozptyl částic do okrajů depoziční komory zvyšující tímto způsobem efektivitu celého procesu. [6] [32]



Obr. 19 Schéma PVD technologie s magnetronovým naprašováním [36]

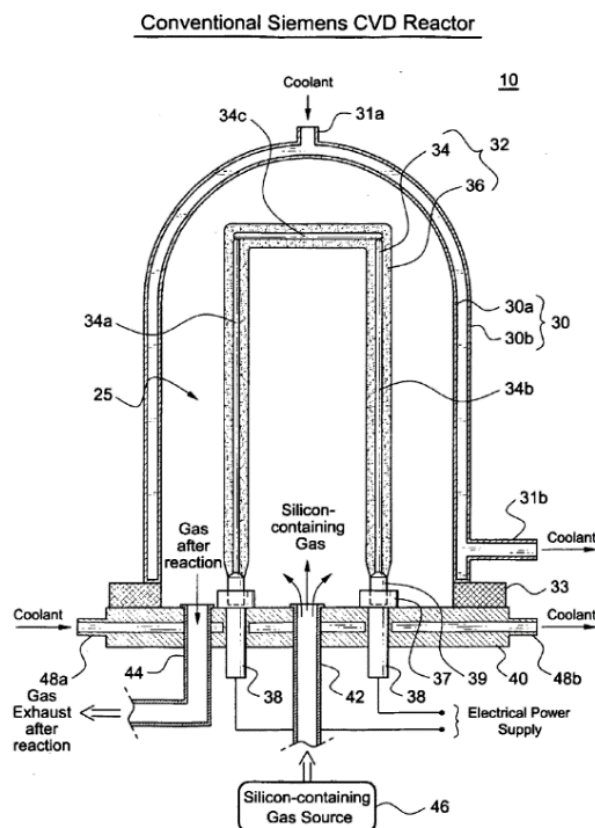
2.3.5.2.2 Chemické metody depozice vrstev CVD (Chemical Vapour Deposition)

U metody CVD je oproti metodě fyzikální depozice PVD využita chemická depozice z plynné fáze. Nanášení vrstvy probíhá chemickou reakcí jednoho nebo více prekursorů (halogenidy, karbonyly, organokovové sloučeniny apod.) za různě vysokých teplot (dle prekursorů od 280 po 1200 °C). [6] [32]

Technické řešení CVD metody spočívá v zařízení chemického reaktoru, který má otevřený vstup prekursorů ze zplyňovacího systému a výstup odpadních plynů (zreagovaných) ze systému do vývěvy. Velikost tlaku plynů v reaktoru se liší dle typu vytvářeného povlaku od ultra vysokého vakua až po atmosférický tlak (většinou ale desítky až stovky Pa). Jako prekursor je možné použít i neplynné materiály, ale je nutností jejich zplynění do podoby roztoků nebo aerosolů. [6] [32]

K samotné chemické reakci a depozici vrstvy je potřeba chemický proces aktivovat, nejběžněji změnou teploty prekursorů na hodnoty od 800 do 2 000 °C (tzv. metoda TCVD- Thermal CVD). Způsobů ohřevu je mnoho, ale základní konstrukční rozdělení je na teplostěnný (izotermická pec) a chladnostěnný reaktor (ohříván pouze substrát). Nevýhodou CVD metody jsou vysoké aktivační teploty, které metodu omezují pouze

na dostatečně tepelně odolné substráty. Vysoká teplota depozice navíc způsobuje velké zbytkové pnutí ve vrstvě. [6] [32]



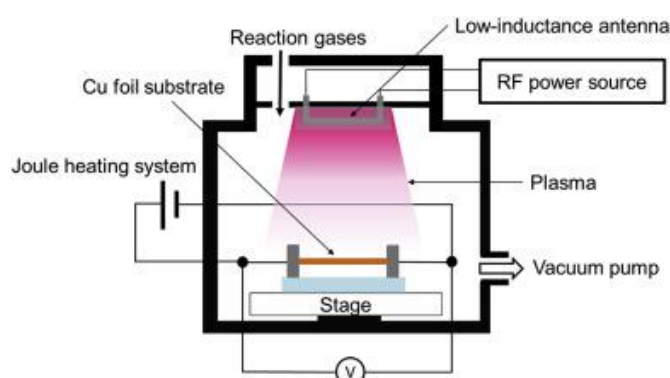
Obr. 20 Schematické znázornění CVD metody z patentu firmy Siemens [37]

2.3.5.2.3 Metoda CVD za použití plazmatu – PACVD/PECVD (Plasma Assisted/Enhanced CVD)

Vývoj této metody přinesl zásadní kvalitativní změnu ve výrobě tenkých vrstev. Princip metody je podobný klasické metodě CVD. Rozdíl nastává před samotnou depozicí, kdy je plynná atmosféra ionizována a pomocí doutnavého (studeného) výboje aktivována. Tím je snížena potřebná depoziční teplota a lze použít i na teplotu citlivý substrát. PACVD technologie tak kombinuje fyzikální kondenzaci a adsorpci spolu s chemickým procesem tvorby deponované vrstvy. [6] [32]

’t

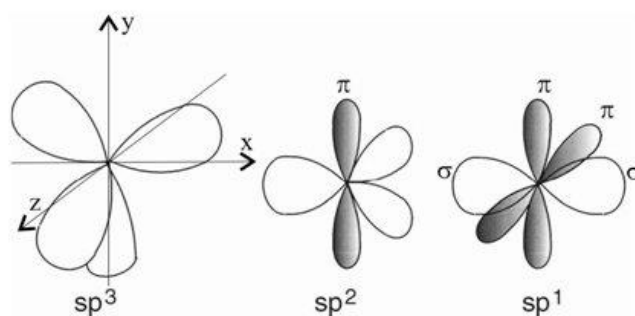
DLC povlaky deponované touto metodou rostou jako spojitá vrstva již od tloušťky menší jak 50 nm a jsou homogenní. Díky metastabilní struktuře DLC povlaků je k dosažení požadovaných vlastností povlaku nutné, aby byl během depozice jejich povrchy neustále bombardován aktivními ionty. Depozice DLC musí probíhat do teploty 325 °C substrátu, kdy již dochází ke grafítizaci a tím k měknutí vrstvy. Je tedy nutné držet teplotu co nejnižší i kvůli faktu, že depoziční rychlost roste s klesající teplotou a rostoucí intenzitou iontového bombardu na povrchu. Velké rozpětí hodnot výsledných parametrů (součinitel tření, tvrdost, apod.) DLC povlaků, vzniká díky velké rozmanitosti použitelných prekursorů a depozičních parametrů. [32]



Obr. 21 Schéma PACVD technologie za použití RF ionizace [38]

2.3.5.3 DLC povlaky

DLC povlaky vznikají použitím uhlovodíkových plynů při PACVD depozici vrstvy. Struktura je dána metastabilní formou amorfního uhlíku s různým zastoupením sp^3 (diamant), sp^2 (grafit), sp^1 hybridizací a vodíku. [32]



Obr. 22 Hybridizační stavy [34]

Vyšší podíl sp^3 hybridizace vede k větší mechanické, chemické a elektrické odolnosti, zatímco vyšší podíl sp^2 hybridizace má za následek lepší kluzné vlastnosti. Procentuální zastoupení jednotlivých hybridizací má tedy vliv na konečné vlastnosti vrstvy. Tento poměr je úzce spjat s metodou přípravy povlaku. Různými nastaveními procesu depozice vrstvy je tedy možno docílit různých požadovaných vlastností. [32]

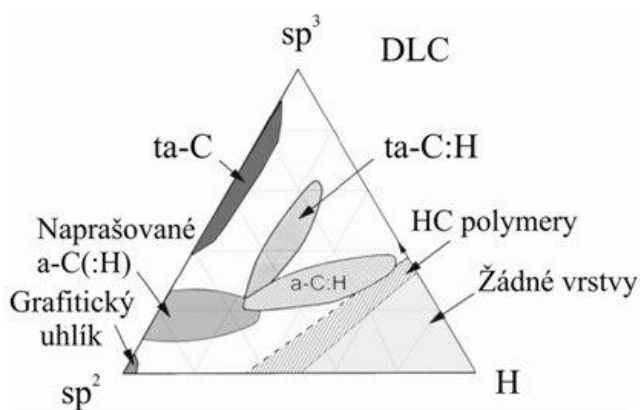
Při větším množství obsaženého vodíku se setkáváme s pojmem amorfni hydrogenované uhlíkové vrstvy (a-C:H). Tyto amorfni vrstvy pokrývají oblast vlastností od polymerů až po tvrdé otěruvzdorné vrstvy, díky různému podílu vodíku ve struktuře. Výsledné parametry deponované vrstvy jsou závislé především na energii iontů během depozice. Při nízké energii iontového bombardu zůstává ve vrstvě i víc jak 60 % vodíku a vznikají měkké vrstvy podobné polymerům (PLC-Polymer Like Carbon). Naopak při velmi vysoké energii ($>100\text{eV}$) je většina vodíku odstraněna (zůstává mezi 10 až 35%) a vrstva získává velkou tvrdost. Vrstvy bez obsahu vodíku se nazývají amorfni ulík a-C ($< 1\%$ vodíku) a tetrahedrální amorfni uhlík ta-C (0 % vodíku). Ve srovnání s a-C:H mají vrstvy a-C mnohem vyšší tvrdost, modul pružnosti a odolnost proti opotřebení. [32]

Pro možnost změny a zlepšení parametrů DLC povlaků se při depozici povrch dopuje látkami, jako jsou N, F, Si, F nebo různé kovy (Me, apod). Cílem je například snížení velkého vnitřního pnutí (N, Si, kovy) či ještě větší snížení koeficientu tření (F, Si-O). Zmiňované vnitřní pnutí omezuje tloušťku deponované vrstvy a zhoršuje adhezi k substrátu. Velikost pnutí je závislá na mnoha faktorech. Jedním z nich je velikost předpětí substrátu při depozici. Dalším je velikost tlaku během depozice, kde bylo prokázáno s rostoucím tlakem snižující se vnitřní pnutí. Mimo jiné je pnutí snižováno i vyšším podílem vodíku ve vrstvě. Díky metastabilní formě DLC struktury, je praktické použití pouze do hranice $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy již dochází k nenávratně přeměně na grafit doprovázeným efúzí vodíku a uhlíku. [32]

Mezi nesrovnatelné výhody DLC povlaků patří minimální adheze k ostatním materiálům (suché obrábění) a možnost depozice na nízko i vysoce legované ocele, většinu neželezných kovů, všechny druhy keramiky, některé plasty a dokonce sklo. Navíc je lze díky velkému

rozsahu vlastností použít prakticky kdekoliv (i v lidském těle díky jejich biokompatibilitě). [32]

Tribologické vlastnosti DLC povlaků úzce závisí na prostředí. Ve vakuu nebo v inertní atmosféře lze při použití a-C:H dosáhnout extrémně nízkého koeficientu tření (0,04 až 0,006). V normálních podmínkách s vlhkostí mezi 30 až 60 % jsou hodnoty kolem 0,2, což je oproti ostatním vrstvám stále nízké. Za hlavní důvod takto nízkého koeficientu tření se považuje vznik tzv. transferové vrstvy na povrchu třecí dvojice, kde vzniká užitečný grafitický film (suché mazivo). U a-C vrstev dosahuje koeficient tření ve vakuu 0,8, zatímco ve vodě 0,03 a v oleji 0,08. [32]



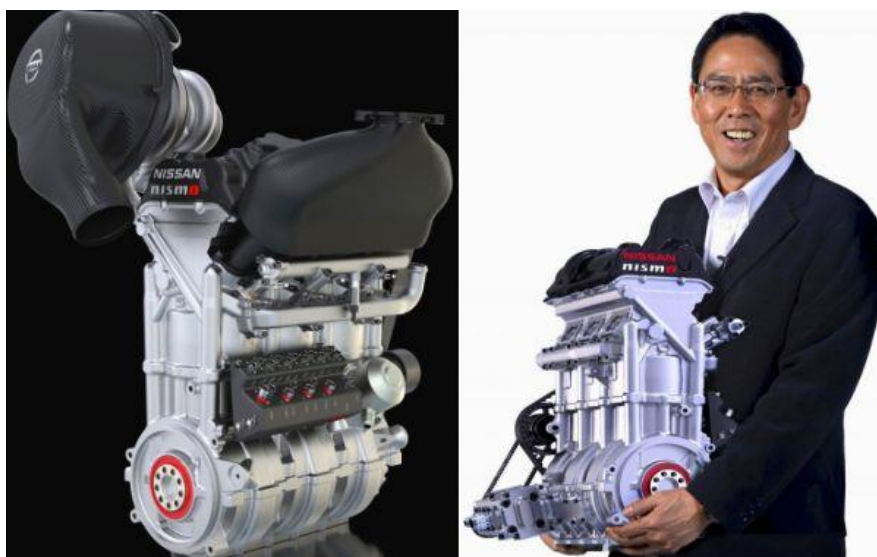
Obr. 23 Ternární fázový diagram vazeb [35]

2.4 Konstrukční úpravy

Nátlak úřadu na plnění stále přísnějších emisních norem a také vzájemná konkurence na trhu, dovedly automobilky k několika konvenčním i nekonvenčním úpravám na pohonném ústrojí. Vyjmenování a popis všech těchto úprav by samo o sobě vydalo na několik publikací, proto jsou v následujících podkapitolách popsány a vyzdviženy jen některé z nich.

2.4.1 Downsizing

Prvním a pro motoristy neoblíbeným způsobem zvyšování mechanické účinnosti je tzv. downsizing. Pod tímto pojmem se schovávají občas radikální změny a obecně ho lze ale pochopit jako snižování hmotnosti, rozměrů a zvyšování litrového výkonu získaného s pomocí přeplňování turbodmychadlem. Pro redukci tření a zvýšení mechanické účinnosti se výrobci u těchto motorů uchylují například k redukci počtu pohyblivých dílů. Konkrétně se snižuje počet válců potažmo celé pístové skupiny, ojníc, ložisek a samozřejmě i ventilů. To má za následek méně kontaktních dvojic a méně hmoty, kterou je potřeba rozhýbat. Na druhou stranu, ale ve většině případů dochází k nevyváženému chodu (3 válce), který má kromě nepříjemného zvuku a vibrací také na svědomí větší namáhání ložisek vyvažovací hřídele vedoucí k částečnému návratu nežádoucího tření. [10]



Obr. 24 Downsizovaný motor DIG-TR od firmy Nissan s litrovým výkonem 196 kW/dm^3 [39]

Dalším základním faktorem u downsizingu je přeplňování turbodmychadlem. S pomocí turbodmychadla je nasát vzduch, stlačen a poslán přes mezichladič do spalovací komory. Zde je ke zvětšenému objemu vzduchu přidáno více paliva, vedoucím k vyššímu výkonu, než kterého by byl motor schopen motor dosáhnout bez přeplňování. Komponenty motoru jsou tak mnohem více namáhány, než by byly při klasickém atmosferickém plnění. Nejlepším příkladem downsizingu je momentálně motor DIG-TR od firmy Nissan, který ze

tří válců o objemu 1,5 litru a celkové hmotnosti 44 kg vyvíjí výkon 400 k. Je nepředstavitelné, jaké tlaky musí na zmenšené součásti působit. Pro zajištění určité spolehlivosti a vysoké mechanické účinnosti této jednotky bylo tedy potřeba použít nejnovějších povrchových úprav a materiálů. [39]

2.4.2 Ostatní konstrukční úpravy

Následující podkapitoly obsahují stručný popis vybraných konstrukční řešení, která jsou již řadu let součástí výrobní filozofie mnoha výrobců a lze je považovat za nejefektivnější.

2.4.2.1 Geometrie pístu

Správnou úpravou tvaru pístu lze docílit zmenšení nosné třecí plochy pláště tlakové a protitlakové strany, kterými se píst dotýká stěn válcu. Takové vybrání hmoty má za následek také snížení hmotnosti pístu, který pak méně zatěžuje zbytek pístní skupiny. [3]



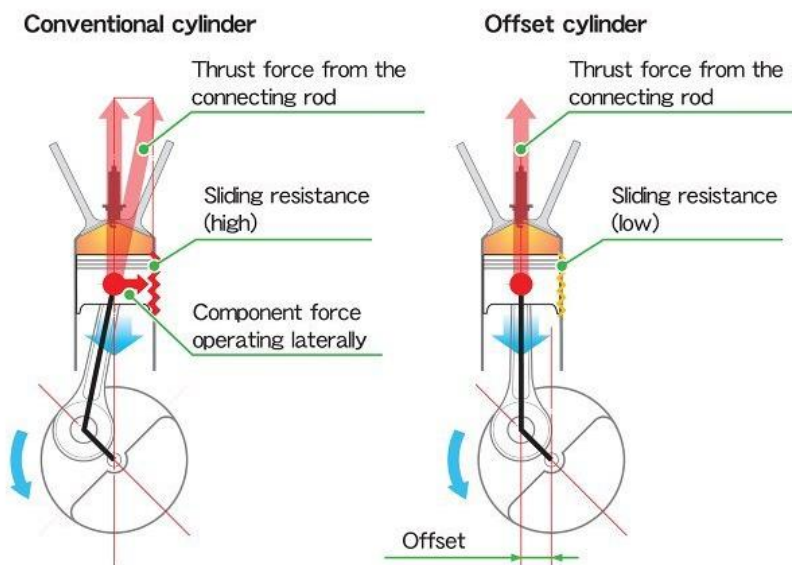
Obr. 25 Různé typy pístů firmy MAHLE pro sportovní použití [40]

2.4.2.2 Umístění pístního čepu

Před výběrem vhodné pozice pro čep je zapotřebí nalézt určitý kompromis. Pokud je čep umístěn do těžiště pístu, dochází ke značné redukci klopného momentu. Jestliže je uložen ke dnu pístu, motor má mnohem menší výšku. Pro rovnoměrnější rozdělení normálových sil na kluznou plochu je naopak lepší, když je čep uprostřed pláště. [13]

2.4.2.3 Offset klikové hřídele

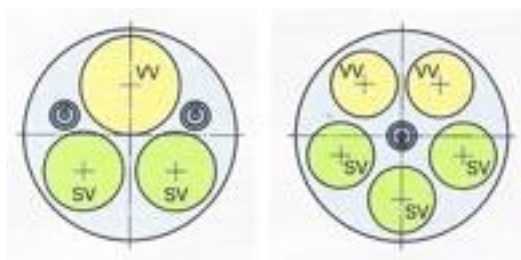
Pro co možná nejmenší zastavěný prostor v motoru je zapotřebí použití krátkých ojníc. Při použití krátké ojnice však dochází ke zvýšení normálových sil tlačících píst na stěnu válce a zvyšujících tak třecí ztráty. Řešení spočívá v odsazení osy klikové hřídele od osy pístu o pár milimetrů. Výsledkem je mimo zmenšení normálových sil, také vyšší výkon díky zvýšenému spalovacímu tlaku v důsledku pomalejší změny objemu válce. [41]



Obr. 26 Rozdíl mezi klasickým a offset řešením [41]

2.4.2.4 Počet ventilů

Zvýšení počtu ventilů z dvou velkých na několik (3, 4, 5) menších vede k nižší hmotnosti ventilů a menšímu průměru. To má za následek nižší potřebné předpětí pružin, a tím i nižší třecí ztráty. Navíc je získána lepší využitelnost plochy vrtání válce a zlepšuje se tak plnicí účinnost válce. [5]



Obr. 27 Uspořádání 3 a 5 ventilů v hlavě válce. [42]

2.4.2.5 Rolničková vahadla

Snížení třecích ztrát pomocí rolničkového vahadla spočívá ve změně kluzného tření na valivé. Toho je využito u ventilových rozvodů, kde se rolnička neustále otáčí spolu s vačkovým hřídelem. Při nízkých otáčkách tak dochází k úsporám až 60%, jelikož při řešení bez vahadla, vačka-hrnek ventilu, dochází na kontaktní dvojici k polosuchému tření. [5]



Obr. 28 Vahadlo s rolničkou a dvoustupňovým nastavením od firmy Deplhi [43]

3 Metody výpočtu a měření mechanických ztrát

Mechanické ztráty přímo ovlivňují spotřebu paliva ve spalovacím motoru. Vzhledem ke zvyšujícím se požadavkům na snižování spotřeby paliva, a tím i ekologické námahy na životní prostředí, se výrobci automobilů zaměřují na vývoj nových technologií. Tyto technologie redukují různé ztráty během spalovacího procesu, jako jsou například ztráty na výměně náplně válce, zvyšování termodynamické účinnosti nebo snížení normálových sil a tím i vznikajících třecích ztrát.

Od výrobců automobilů a pohonných jednotek se tedy očekává určitá predikce třecích ztrát v motoru už ve fázi vývoje. V současnosti máme několik metod obecně rozdělených na výpočetní a experimentální. [15]

Výpočetní:

- empirické modely
- semiempirické modely
- výpočtové modely založené na metodě konečných prvků (MKP)

Experimentální (založené na měření a pozorování):

- vysokotlaká indikace motoru (za účasti spalování)
- protáčení motoru elektrickým dynamometrem (bez účasti spalování)
- extrapolace křivky spotřeby paliva (Willansova metoda)
- postupné odpojování jednotlivých válců za konstantních otáček motoru (Morseova metoda)
- doběhová křivka motoru (bez spalování)

3.1 Metody výpočtu mechanických ztrát

3.1.1 Empirické modely

Empirické výpočetní modely vznikají na základě měření mechanických ztrát na větším počtu motorů se stejným typem spalování o různém zdvihovém objemu. S pomocí korelace naměřených dat lze získat konkrétní koeficienty C_1 až C_3 , s jejichž pomocí lze sestavit jednoduchou rovnici pro průměrný odhad celkových mechanických ztrát a to ve tvaru: [15]

$$p_{mech.z.} = C_1 + C_2 \cdot n + C_3 \cdot n^2 = [kPa] \quad (10)$$

$p_{mech.z.}$ [kPa] střední tlak ztrát motoru

n [min^{-1}] otáčky motoru

Na základě mnoha experimentů a měření vzniklo několik empirických vztahů, které jsou závislé na typu a velikosti motoru. Jako první lze uvést empirický vztah pro výpočet mechanických ztrát čtyřdobého zážehového motoru s plně otevřenou škrtkou, vzniklý protáčením motoru bez účinku spalování: [15]

$$p_{mech.z.} = 0,97 + 0,15 \cdot \left(\frac{n}{1000}\right) + 0,05 \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 = [kPa] \quad (11)$$

Při protáčení čtyř a šestiválcových vznětových motorů vznikl vztah: [15]

$$p_{mech.z.} = C_1 + 48 \cdot \left(\frac{n}{1000}\right) + 0,4 \cdot c_p^2 = [kPa] \quad (12)$$

kde se konstanta $C_1=75$ kPa používá pro motory s přímým vstřikováním a $C_1=110$ kPa pro komůrkové motory s nepřímým vstřikováním.

Hlavním nedostatkem těchto metod je, že při protáčení v důsledku absence spalování a tím i spalovacích tlaků vznikají poměrně nadsazené hodnoty. Silnou stránkou těchto výše uvedených vztahů je jednoduchost výpočtu obzvlášť ve chvíli, kdy je potřeba rychlý a kvalifikovaný odhad mechanických ztrát v motoru. [15]

3.1.2 Semiempirické modely

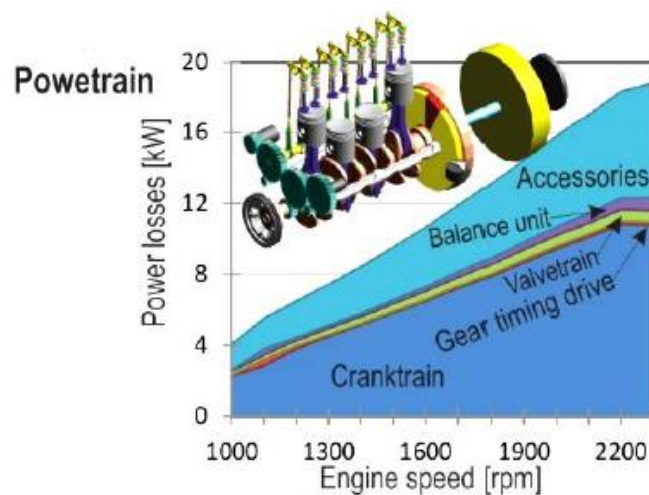
Semiempirické modely oproti empirickým modelům počítají okamžité mechanické ztráty a lze je rozdělit do dvou skupin. První skupina, která počítá okamžité třecí ztráty na každé z dvojic v závislosti na úhlu natočení klikové hřídele za použití semiempirických korelací. Druhá skupina počítá s tlakovým polem mazacího oleje a predikcí třecích ztrát na kontaktních dvojicích v motoru s pomocí Reynoldsovy rovnice (13) pro kluzné ložisko. Výhodou tohoto výpočtu je kromě predikce ztrát, také získání informací o možném zatížení ložiska a tloušťce vytvořené olejové vrstvy v ložisku. [15]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \cdot \mu \cdot \left[U \frac{\partial h}{\partial x} + 2 \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \right] \quad (13)$$

h [mm]	tloušťka olejové vrstvy
μ [Pa.s]	dynamická viskozita oleje
U [m.s ⁻¹]	relativní rychlost

3.1.3 Modely MKP

Složitost výpočtu mechanických ztrát za pomoci metody konečných prvků je přímo závislá na dostupném výpočetním výkonu počítačové jednotky, kompletní znalosti geometrie zkoumaných součástí a jejich fyzikálních vlastností. Řešení třecích ztrát kluzných HD mazaných ložisek je založené na numerickém řešení Reynoldsovy diferenciální rovnice. U výpočtů pomocí MKP nastává zásadní problém při určení okrajových podmínek ve výpočtech s pístními kroužky, a to díky neznámé tloušťce olejového filmu na vstupu do mazací štěrby a jeho viskózním odporem. Konkrétní řešení a jejich popis je vysvětlen v řadě odborných publikací [44],[45]. [15]



Obr. 1 Grafické znázornění ztrátového výkonu pomocí programu ADAMS a MATLAB [44]

3.2 Metody měření mechanických ztrát

3.2.1 Měření na motoru se spalováním (vysokotlaká indikace)

Exaktní postup této metody je ze všech zde popsaných metod nejnáročnější, ale ve výsledku nejvíce přesný. Jedná se o metodu, která vychází z jednoduché rovnice mechanické účinnosti, kde jsou v poměru střední efektivní tlak a střední indikovaný tlak. Rovnice tedy vypadá následovně: [15]

$$\eta_m = \frac{p_{se}}{p_{si}} = \frac{p_{si} - p_{mech.z.}}{p_{si}} = [-] \quad (14)$$

η_m [-] mechanická účinnost motoru

p_{se} [kPa] střední efektivní tlak

p_{si} [kPa] střední indikovaný tlak

$$p_{se} = \frac{\tau \cdot \pi \cdot M_t}{V_Z} = [kPa] \quad (15)$$

M_t [Nm]	točivý moment motoru
V_Z [dm ³]	zdvihový objem motoru
τ [-]	$\tau=2$ pro dvou-dobé motory, $\tau=4$ pro čtyř-dobé motory

$$p_{si} = \frac{\sum_{i=1}^j \oint_{ob\ddot{e}h} \frac{p \cdot dV}{V_{Z1}}}{j} = \frac{\sum_{i=1}^j p_{si1}}{j} \quad (16)$$

j [-]	celkový počet válců
p [kPa]	okamžitý tlak ve válci
dV [cm ³]	přírůstek okamžitého objemu válce
V_{Z1} [cm ³]	zdvihový objem jednoho válce
p_{si1} [kPa]	střední indikovaný tlak jednoho válce

Díky obsaženému křivkovému integrálu v rovnici (16) je zřejmá nutnost změřit samotný průběh tlaku ve válci v závislosti na poloze klikového hřídele. Střední tlak ztrát se při plném zatížení pohybuje zhruba o řád níže než střední indikovaný tlak. Ze vztahu pro výpočet mechanické účinnosti tak vyplývá, že velká změna středního tlaku ztrát při plném zatížení nezaprůčiní výraznou změnu mechanické účinnosti. Výpočet středního tlaku ztrát $p_{mech.z.}$ [kPa] je popsán rozdílem středního indikovaného tlaku a středního efektivního tlaku: [15]

$$p_{mech.z.} = p_{si} - p_{se} \quad (17)$$

3.2.2 Metoda protáčení motoru elektrickým dynamometrem (bez spalování)

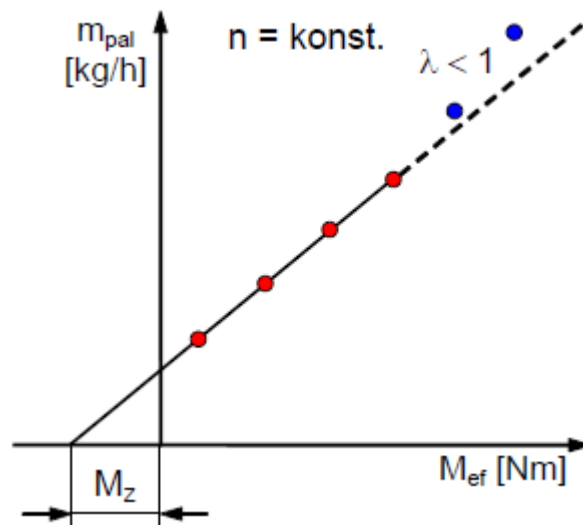
Jedná se o velmi oblíbenou metodu dávající relativně dobré výsledky. Zapotřebí je pouze dynamometr schopný pracovat v motorickém režimu, tedy při protáčení motoru bez spalování. Při absenci tlaku ve válcích dává metoda velmi nadhodnocené výsledky. Ve výsledku tedy chybí práce nutná na výměnu náplně válce a termodynamické ztráty. [15]

Pokud se zajistí náhradní pohon, lze například odpojovat různé pomocné mechanismy a určit tak jednotlivé složky pasivních odporů. Odpojit lze například vodní pumpu, olejové čerpadlo, alternátor či provádět náročnější experimenty, kterými jsou měření dílčích ztrát na válcích s různým počtem pístních kroužků nebo odstranění rozvodového mechanismu. [15]

Na rozdíl od hodnot získaných na běžícím motoru pomocí metody měření na motoru se spalováním, budou výsledky mechanických ztrát pomocí protáčení odlišné z několika důvodů. Prvním takovým je přítomnost kompresního tlaku a absence spalovacího tlaku ve spalovací komoře. Pístní kroužky jsou tak méně tlačeny na stěnu válce, vytvářejí menší normálové síly, a tím zmenšují výsledné třecí síly. Dalším hlavním problémem je rozdíl teplot komponentů motoru při spalování a při protáčení dynamometrem. Při protáčení motoru jsou vůle mezi součástmi znatelně větší, než při spalování z důvodu teplotní roztažnosti materiálů. Navíc má při protáčení olej vyšší viskozitu a s tím spojené vyšší třecí ztráty. [15]

3.2.3 Metoda extrapolace křivky spotřeby paliva (Willansovy čáry)

Použití této metody spočívá v pouze orientačním určení mechanických ztrát. Pokud je ale v motoru velikost mechanických ztrát přímo závislá na rychlosti otáček a minimálně na zatížení, dává Willansova metoda velmi dobré výsledky. Postup získání Willansovy čáry spočívá ve vynesení spotřeby paliva na osu y v závislosti na středním efektivním tlaku nebo momentu na ose x . Tato křivka se dále extrapoluje, až do nulové spotřeby paliva, kde odečteme vzniklou zápornou hodnotu středního efektivního tlaku (resp. efektivního momentu ztrát), což je ve skutečnosti střední tlak ztrát (resp. ztrátový moment). [15]



Obr. 2 Znáznorněná Willansova čára [4]

3.2.4 Morseova metoda vypínání jednotlivých válců

Výsledky této metody jsou opět pouze orientační a použití je, jak název napovídá, jen pro víceválcové motory. Další omezení spočívá v použití jen na atmosfericky plněné motory kvůli nižší entalpii před turbínou, v důsledku čehož se sníží výkon a plnicí tlak. Postup měření spočívá v odpojování zapalování nebo vstřikování paliva jednotlivých válců na běžícím motoru (se spalováním). Sleduje se pokles výkonu (resp. točivého momentu). [15]

Předpoklad pro výpočet je, že:

$$p_{si} = p_{si1} * j \quad (18)$$

a platí tedy:

$$p_{se} = p_{si1} * j - p_{\text{mech.z.}} \quad (19)$$

kde p_{se} vypočteme dle rovnice (15) kam za M_t dosadíme změřený točivý moment.

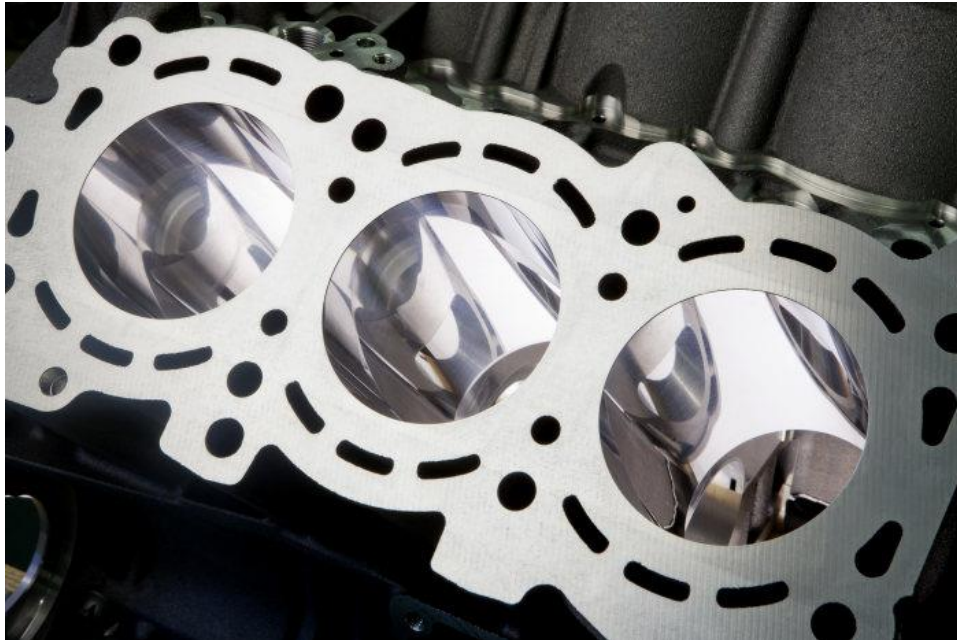
3.2.5 Metoda doběhu motoru (bez spalování)

Princip měření spočívá ve vytočení motoru na maximální otáčky, vypnutím zapalování (resp. vstřikování paliva) a záznamu brzdného momentu až do úplného zastavení motoru. Na výsledek mají negativní vlivy stejné faktory jako u metody protáčení (absence spalovacího tlaku apod.), navíc je potřeba pracně určit redukovaný moment setrvačnosti motoru $I_{mot}[kg \cdot m^2]$. [15] Střední tlak ztrát motoru se v tomto případě počítá dle vztahu:

$$p_{mech.z.} = -\frac{2 \cdot \tau \cdot \pi^2}{V_z} \cdot I_{mot} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (20)$$

4 Aplikace nano-vrstev v pístovém spalovacím motoru

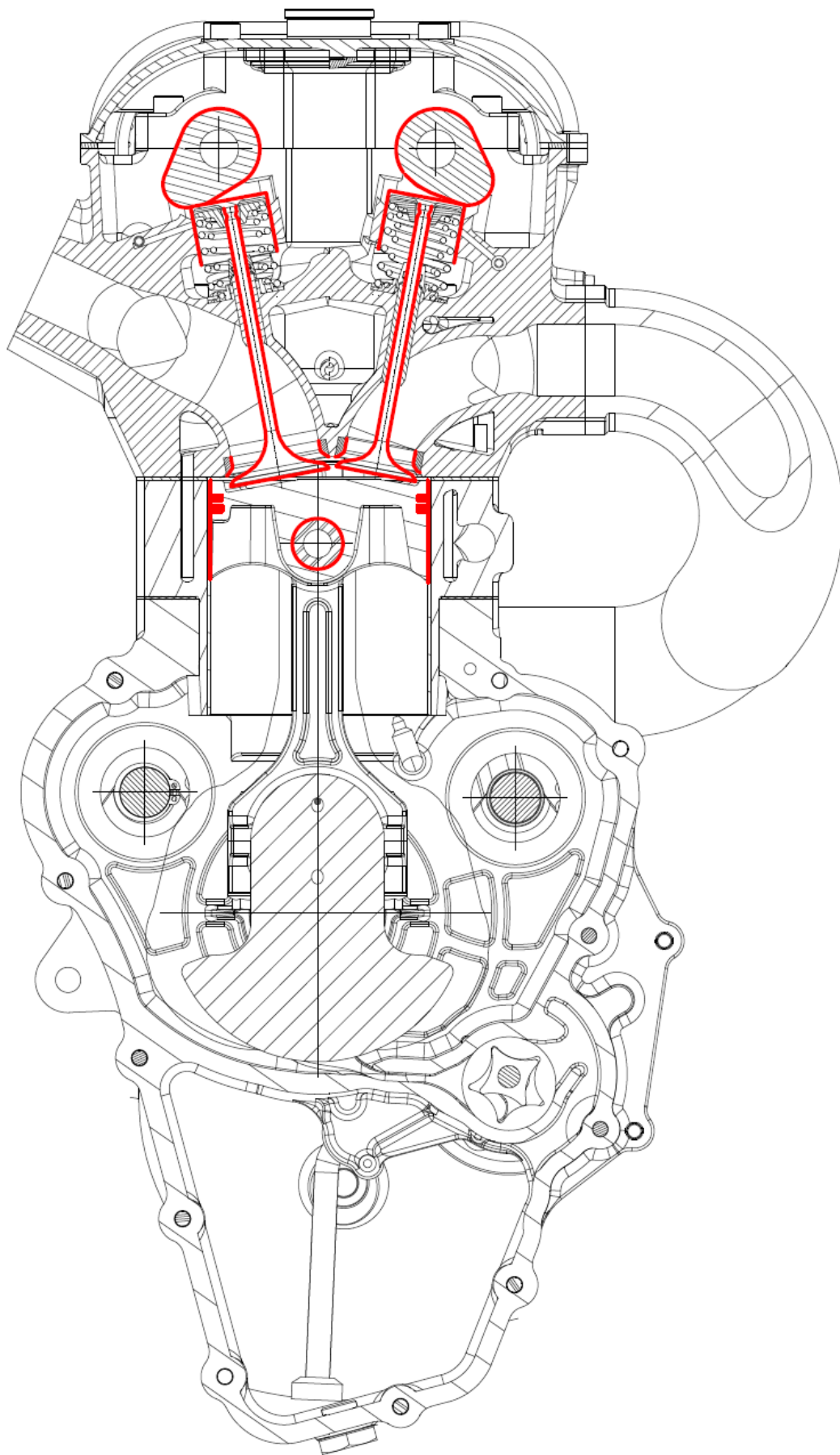
Dle rozboru mechanický ztrát v úvodu práce je jasné, že první ideální oblastí pro použití povlaku je píst. Řada firem již přišla s vlastními povlaky, které více nebo méně přispívají k redukci tření mezi pístem a válcem. S pomocí PVD technologií jsou vícevrstvé povlaky na bázi CrN, WC/C, TiC apod, nanášeny hlavně na pístní kroužky. Firma Federal-Mogul s jejich povlakem nazvaným Carboglide provedla aplikaci na pístní kroužky. Výsledkem bylo mírné zvýšení výkonu, snížení třecích ztrát o 20 %, dvojnásobná redukce relativního opotřebení a snížení spotřeby paliva o 1,5 % [46]. Oerlikon Balzers dokonce zveřejnili snížení třecího koeficientu na pístním kroužku z 0,1 na 0,06 s použitím povlaku BALINIT® WC/C. Prodloužení spolehlivosti kuličkového ložiska z 10^6 na 10^8 cyklů, zvýšení výkonu motocyklu díky aplikaci povlaků na hrnky ventilů a pístní čepy o 2,2 % a spousta dalších zajímavých hodnot jsou dostupné v katalogu výrobce [47]. Pochlubit se může i společnost Daimler vyrábějící vozy Mercedes-Benz. Jejich povrchová úprava NANOSLIDE® vytvářející velmi lesklou, tvrdou a kluznou vrstvu na povrchu válců vykazuje snížení mechanických ztrát na rozhraní píst-válec až o 50 %. [48]



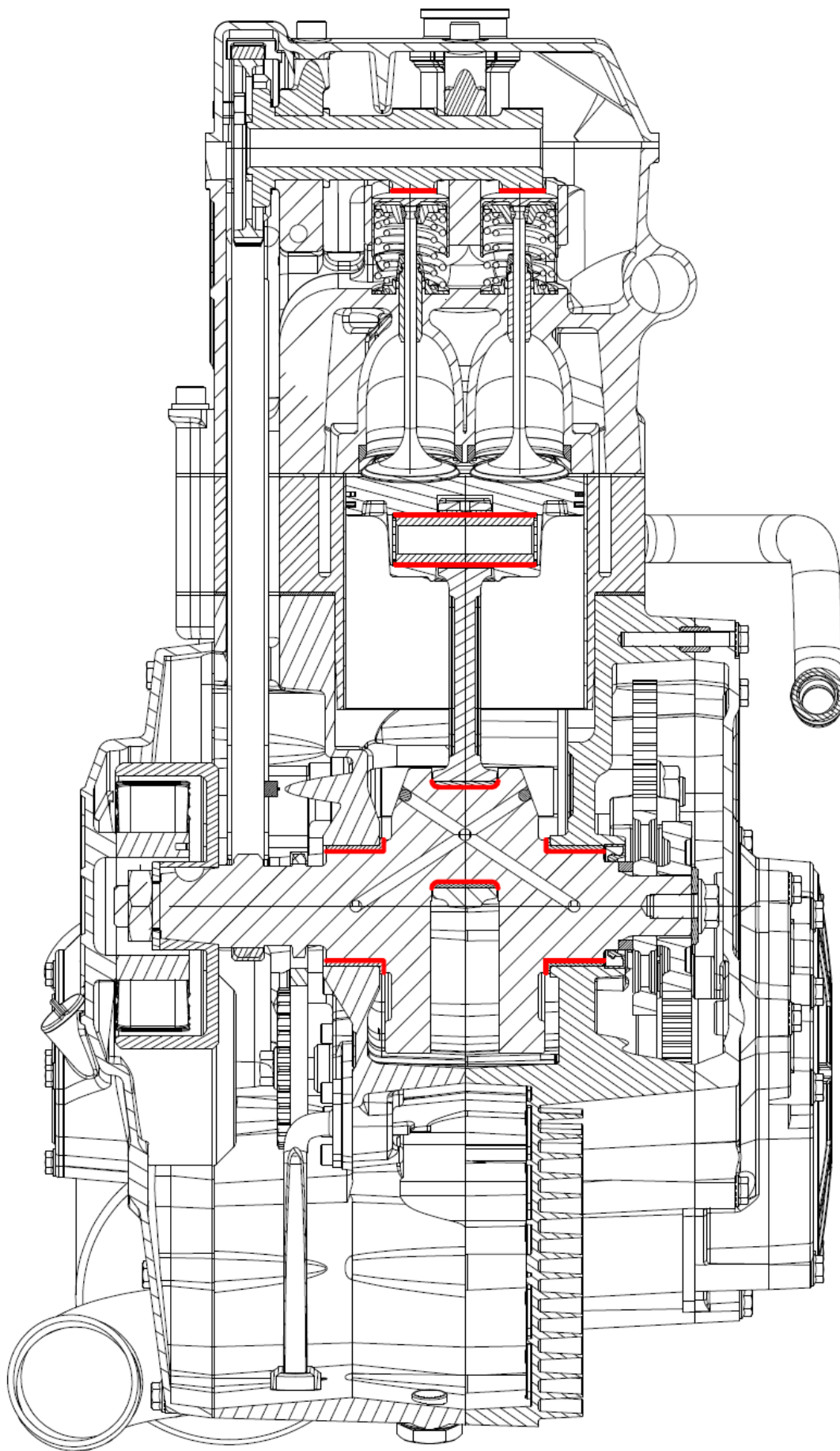
Obr. 29 Blok motoru s aplikovanou vrstvou NANOSLIDE [49]

Dalšími vhodnými místy pro aplikaci tenkých vrstev jsou pístní čepy, povrchy kluzných ložisek, ojniční oka, zdvihátka, vačkové hřídele, palivové, olejové a vodní pumpy, ventilová sedla, vstřikovače paliva atd. Výhody kluzných nano povlaků lze tedy využít prakticky na všech mechanismech v motoru, kdy jedinou otázkou je ekonomická výhodnost takovéto úpravy.

Potenciální plochy k aplikaci tenkých vrstev jsou červeně vyznačeny na následujících dvou řezech jednoválcovým motorem. Vyznačeny byly plochy, jež se na třecích ztrátách podílejí nejvíce. Jako předloha posloužily výkresy motoru o vysokém litrovém výkonu, vypracovaných v rámci předmětu Konstrukční projekt 1 a dodaných vedoucím práce. [50]



Obr. 30 Řez A-A jednoválcovým motorem [50]



Obr. 31 Řez B-B jednoválcovým motorem [50]

Závěr

K redukci mechanických ztrát existuje již dlouhá řada konstrukčních řešení zaobírajících se snižováním tření, tedy zvyšováním životnosti, spolehlivosti a hlavně mechanickou účinností, která se přímo podílí na spotřebě paliva a tvorbě emisí. V posledních letech se stále více hovoří o nanotechnologiích a jejich aplikacích v různých odvětvích průmyslu, nevyjímaje technologický vývoj pohonných jednotek. V případě pístového spalovacího motoru se jako nejpoužitelnější jeví aplikace tenkých nanovrstev na vysoce namáhané součásti tvořící třecí dvojice. Návrhu povlaku předchází studie dějů v motoru, kde se musí brát na zřetel mnoho faktorů. Faktory jako jsou třeba teplota, typ namáhání, prostředí nebo materiály třecích dvojic nás omezují na správnou kombinaci použitých povlaků. Například použití některých DLC povlaků ve spalovací komoře motoru může vést zahříváním k degradaci vrstvy. Také je potřeba zajistit, aby byl jeden povrch ze třecí dvojice vždy měkčí než ten druhý a nedocházelo tak k zadírání. Hlavní použití DLC povlaků nachází již značnou dobu v závodních motorech, kde jsou časem prokázány jeho nesporné přínosy na zvyšování výkonu a účinnosti motorů. DLC povlak se tak jeví jako nejlepší kandidát k použití v sériové výrobě. Pro návrh správného povlaku je v dnešní době k dispozici široká škála materiálového složení vrstvy včetně technologických zkušeností s nastavováním depozičních parametrů.

Další cestou ke zvýšení výkonu je zcela určitě i vývoj plně syntetických olejů, laserové texturování povrchů a chytré konstrukční úpravy na třecích dvojicích. Vývoj konstrukčních úprav je v současnosti umocněn vývojem v IT a elektronice. Zde se pomocí softwaru využívá dostupného výpočetního výkonu, k návrhu optimální geometrie a hmotnosti součásti s použitím metody konečných prvků.

Hlavním problémem je vždy ekonomická stránka věci. Jako u každé nové technologie jsou i u vytváření speciálních povlaků nutné velké investice do nových depozičních a pomocných zařízení, možnost sériovosti apod. To má za následek vyšší náklady na výrobu a výslednou cenu pro zákazníka. V dnešní době je automobil považován za spotřební zboží s průměrnou životností 200 000 km. Snaha automobilek vedoucí ke zlepšení životnosti pohonných jednotek je tak diskutabilní.

Použité zdroje

- [1] BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1621-8.
- [2] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [3] MACEK, Jan. *Spalovací motory*. 2. vyd. V Praze, 2012. ISBN 978-80-01-05015-6
- [4] PÁV, Karel. *Mechanická účinnost PSM*. KVM TUL [online]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2736>
- [5] SCHOLZ, Celestýn a Pavel BRABEC. *Konstrukční projekt pístového spalovacího motoru*. 3., přepracované vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-201-3.
- [6] HOŠEK, Jan. *Úvod do nanotechnologie*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04555-8.
- [7] *Složky oleje*. [online]. Dostupné z: <http://www.znackoveoleje.cz/znackoveoleje/5-ZAJIMAVOSTI/12-Slozky-oleje-aditiva>
- [8] Přednášky. *Tribologie*. ÚK, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně. [online]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/tribologie/prednasky/>
- [9] *Friction Modifiers for Next Generation Engine Oils*. Lube-Tech. [online]. Dostupné z: <http://www.lube-media.com/documents/contribute/Lube-Tech092-FrictionModifiersforNextGenerationEngineOils.pdf>

- [10] *Radostný i bolestný vývoj nových motorů*. [online]. Dostupné z:
<http://www.autopress.cz/?page=311.radostny-i-bolestny-vyvoj-novych-motoru>
- [11] *Nissan's 40kg 400HP Engine*. [online]. Dostupné z:
<http://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/7071/Nissans-40kg-400HP-Engine.aspx>
- [12] PEŠEK, M. *Snižování tření a opotřebení u spalovacích motorů*. [online]. Dostupné z:
http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=525
- [13] TOMIĆ, Rudolf a Momir SJERIĆ. *THE OPTIMIZATION OF CRANKSHAFT OFFSET OF SPARK IGNITION ENGINE*. [online]. Dostupné z:
<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2012Journal/48.pdf>
- [14] KOŽOUŠEK, Josef. *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [15] EMRICH, Miloslav. *Predikce mechanických ztrát spalovacích motorů*. [online]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2011/2011_78_01.pdf
- [16] MOHYLA, M. *Technologie povrchových úprav kovů*. První vydání, Ostrava: VŠB, 1995. ISBN 80-707-8267-6.
- [17] MAHLE. *Cylinder Components: Properties, Applications, Materials* [online]. Vieweg, Teubner, 2010. ISBN 9783834896971 3834896977. Dostupné z:
<http://books.google.cz/books?id=GTm077l39EUC&pg=PA125&dq=nikasil&hl=cs&sa=X&ei=WeNSUabsHoSK7AbLqoGwCg&ved=0CEYQ6AEwBA#v=onepage&q=nikasil&f=false>

- [18] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, ISBN 80-7082-668-1
- [19] *Tribologie*. Katedra strojírenské technologie, TU v Liberci. [online]. Dostupné z: www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf
- [20] ERJAVEC, J. *Automotive technology: A system approach* [online]. Thomson/Delmar Learning, 2005. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=U4TBoJB2zgsC&pg=PA231&dq=cylinder+surface&hl=cs&sa=X&ei=MfhSUB-aEcTJtQaLiYDgCg&ved=0CDgQ6AEwAg#v=onepage&q=cylinder%20surface&f=false>
- [21] JAN, Z. *Automobily 3: Motory*. První vydání, Brno: Avid s.r.o. Brno, 2000. Schvalovací doložka MŠMT ČR: Č.j. 16 916/2001.
- [22] KOVAŘÍK, L., FERENCEY, V., SKALSKÝ, R., ČÁSTEK, L. *Konstrukce vozidlových spalovacích motorů*. První vydání, Praha: Naše vojsko, 1992. ISBN 80-206-131-7.
- [23] *Rebirth Of The Gen V LT1 Small-Block...Part Two!* [online] Dostupné z: <http://www.superchevy.com/how-to/engines-drivetrain/sucp-1303-gm-gen-v-lt1-small-block/>
- [24] TULKA, Jaromír. *Povrchové úpravy materiálů*. První vydání, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2005. ISBN 80-214-3062-1.
- [25] DAĐOUREK, Karel. *Vybrané technologie povrchových úprav*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-168-8.
- [26] PODJUKLOVÁ, J. *Speciální technologie povrchových úprav I*. 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava, 1994. 76s. ISBN 80-7078-235-8

- [27] *Žárové nástřiky*, VZÚ Plzeň. [online]. Dostupné z: <https://www.vzuplzen.cz/zarove-nastriky/technologie.php>

- [28] *Žárové stříkání*. [online]. Dostupné z: <http://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>

- [29] *Reconditioning of Aluminium Engine Blocks*. [online]. Dostupné z: <http://www.electrosil.com.au/pdf/KS.pdf>

- [30] RYK, G a I ETSION. *Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction*. [online]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164806000329>

- [31] ETSION, I a G HALPERIN. *The effect of various surface treatments on piston pin scuffing resistance*. [online]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164806000330>

- [32] SOSNOVÁ, Martina. *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování*. [online]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnova.pdf

- [33] JECH, Vladimír. *Vlastnosti tenkých DLC vrstev*. [online]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/JechVladimir-307381.pdf>

- [34] *Použití DLC povlaků (nejen) v automobilovém průmyslu*. [online] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu.html>

- [35] *POVLAKY – řešení pro snižování nákladů a zvyšování produktivity*. [online]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22012/povlaky-reseni-pro-snizovani-nakladu-a-zvysovani-produktivity.html>
- [36] *Physical Vapour Deposition (PVD)*. [online]. Dostupné z: <https://www.oxford-instruments.com/products/etching-deposition-and-growth/plasma-etch-deposition/physical-vapour-deposition>
- [37] *CVD reactor with energy efficient thermal-radiation shield*. [online]. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/EP2330232A1?cl=en>
- [38] Ryuichi Kato, Satoshi Minami, Yoshinori Koga, Masataka Hasegawa. *High growth rate chemical vapor deposition of graphene under low pressure by RF plasma assistance*. [online]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622315303717>
- [39] *Nissan develops lightweight V3 engine for ZEOD RC electrified car*. [online]. Dostupné z: <http://www.damngeeky.com/2014/01/29/17928/nissan-develops-lightweight-v3-engine-zeod-rc-electrified-car.html>
- [40] *From Formula 1 to Speedboats: MAHLE never stands still*. [online]. Dostupné z: <http://www.us.mahle.com/mahlemotorsports/>
- [41] *Free power! offset cylinders explained*. [online]. Dostupné z: <https://rideapart.com/articles/free-power-offset-cylinders-explained>
- [42] *Ventilové rozvody čtyřdobých spalovacích motorů*. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/160/12.html>
- [43] *Delphi 2-Step Valve Lift Systém*. [online]. Dostupné z: <http://www.delphi.com/manufacturers/auto/powertrain/gas/valvetrain/2step>

- [44] NOVOTNÝ, Pavel, Václav PÍŠTĚK, Richard AMBRÓZ a Lubomír DRÁPAL.
*MODERN COMPUTATIONAL APPROACHES TO POWERTRAIN MECHANICAL
LOSS SOLUTION*. In: [online]. 2010 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z:
http://pernerscontacts.upce.cz/20_2010/Novotny.pdf
- [45] *Tribological research and design for engineering systems*. Boston: Elsevier, 2003.
ISBN 978-0-444-51243-7.
- [46] *PISTON RING COATING REDUCES GASOLINE ENGINE FRICTION*. [online].
Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/257808046_Piston_Ring_Coating_Reduces_Gasoline_Engine_Friction
- [47] *Greater performance and reliability*. Oerlikon Balzers. [online]. Dostupné z:
https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/balzers/oerlikon_HQ040EN_1011_web_locked.pdf&download=1
- [48] *Patented technology reduces fuel consumption and emissions: NANOSLIDE®
Developers nominated for German Future Prize*. [online]. Dostupné z:
<http://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Patented-technology-reduces-fuel-consumption-and-emissions-NANOSLIDE-Developers-nominated-for-German-Future-Prize.xhtml?oid=13754136>
- [49] *Mercedes-Benz Nanoslide: Ultra Low Friction Engine Tech*. [online]. Dostupné z:
http://www.motorauthority.com/news/1067549_mercedes-benz-nanoslide-ultra-low-friction-engine-tech
- [50] BÁRTA, Miroslav. Model a výkresy jednoválcového motoru v rámci předmětu
Konstrukční projekt 1, TU v Liberci roku 2014.

- [51] *Optimizing Friction: The Basis for Safeguarding the Future of Combustion Engines.*
[online]. Dostupné z:
http://www.secs.oakland.edu/~frick/Vienna_MS_12/Wien%202012%20Beitrag%20Daimler%20AG_Reibung_EN_end2_1.pdf
- [52] *Mazda Skyactiv - Nová technika z Japonska - Speciální příloha Auto.cz.* [online].
Dostupné z: <http://www.auto.cz/mazda-skyactiv-specialni-priloha-autocz-60569>
- [53] *MOTORY ECOBOOST. DŮKAZ, ŽE VĚTŠÍ NEMUSÍ VŽDY ZNAMENAT LEPŠÍ.*
[online]. Dostupné z: <http://www.ford.cz/novinky-a-technologie/motory-ecoboost>
- [54] *The Aluminium Automotive manual.* [online]. Dostupné z: <https://european-aluminium.eu/media/1575/aam-applications-power-train-3-cylinder-linings.pdf>